

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A
KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

DIAGNOSTIKA VLASTNOSTÍ ELEKTROIZOLAČNÍCH KAPALIN

DIAGNOSTICS OF ELECTROINSULATING LIQUIDS PROPERTIES

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Tomasz Makówka

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Martin Frk, Ph.D.

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektrotechnická výroba a management

Student: Bc. Tomasz Makówka

ID: 77931

Ročník: 2

Akademický rok: 2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Diagnostika vlastností elektroizolačních kapalin

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte fyzikální podstatu dynamické viskozity a elektrické vodivosti elektroizolačních kapalin a uveďte přehled diagnostických metod pro jejich sledování. Zpracujte přehled elektroizolačních olejů používaných v elektrotechnickém průmyslu.

Sestavte pracoviště pro sledování dynamické viskozity, v širším teplotním rozsahu, s využitím několika měřicích metod.

Na různých vzorcích elektroizolačních, včetně biologicky odbouratelných, kapalin realizujte praktická měření vybraných veličin v průběhu degradace a porovnejte je. Na získané výsledky aplikujte Waldenův zákon a ověřte možnou využitelnost metody k diagnostice aktuálního stavu kapalných izolantů po tepelném a elektrickém namáhání.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 8.2.2010

Termín odevzdání: 27.5.2010

Vedoucí práce: Ing. Martin Frk, Ph.D.

prof. Ing. Jiří Kazelle, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

LICENČNÍ SMLOUVA POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Bc. Tomasz Makówka
Bytem: Hornosušská 83, 73535, Horní suchá
Narozen/a (datum a místo): 05. 05. 1986, Český Těšín

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 244/53, 602 00, Brno
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:

.....

(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- ☐ disertační práce
 - ☐ diplomová práce
 - ☐ bakalářská práce
 - ☐ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako
- (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Diagnostika vlastností elektroizolačních kapalin

Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. Martin Frk, Ph.D.

Ústav: Ústav elektrotechnologie

Datum obhajoby VŠKP:

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v * :

- ☐ tištěné formě — počet exemplářů
- ☐ elektronické formě — počet exemplářů

* hodící se zaškrtněte

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ☐ ihned po uzavření této smlouvy
 - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
 - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
 - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
 - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne:

.....
Nabyvatel

.....
Autor

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá elektroizolačními kapalinami, jejich vlastnostmi a použitím v elektrotechnickém průmyslu. Podrobněji je zkoumána dynamická viskozita, elektrická vodivost a diagnostické metody pro sledování těchto veličin. V praktické části práce jsou měřeny tyto veličiny na vzorcích minerálních transformátorových olejů ESTO BNX, RENOLIN ELTEC a biologicky odbouratelného oleje MIDEL 7131 v průběhu degradace. Na naměřené výsledky je aplikován Waldenův zákon.

Klíčová slova

Kapalné izolanty, diagnostika, dynamická viskozita, elektrická vodivost, stárnutí, hustota, transformátorový olej.

Abstract

The diploma thesis deals with the liquid insulators, their properties and their use in the electrical industry. The general aim is to study the physical essence of the dynamic viscosity, the electric conductivity and the diagnostic methods for monitoring these variables. The experimental part contains measuring the dynamic viscosity and the electric conductivity of the mineral transformer oils ESTO BNX, RENOLIN ELTEC and the biodegradable oil MIDEL 7131 during the degradation. The Walden rule is applied on measured results.

Keywords

Liquid insulators, diagnostics, dynamic viscosity, electric conductivity, ageing, density, transformer oil.

MAKÓWKA, T. *Diagnostika vlastností elektroizolačních kapalin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 62 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Frk, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že jsem tuto vysokoškolskou kvalifikační práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrální práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury. Jako autor uvedené semestrální práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této semestrální práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících a následujícího autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

.....

Poděkování:

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Martinu Frkovi, Ph.D. za metodické vedení a cenné rady, které mi poskytl během vypracování práce.

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	9
SEZNAM TABULEK	11
ÚVOD	12
1 TEORETICKÁ ČÁST	13
1.1 KAPALNÉ IZOLANTY	13
1.1.1 Minerální oleje	13
1.1.2 Rostlinné oleje	14
1.1.3 Syntetické izolační kapaliny	14
1.2 DYNAMICKÁ VISKOZITA	16
1.2.1 Poiseuilleův vztah	17
1.2.2 Stokesův vztah	17
1.3 METODY MĚŘENÍ DYNAMICKÉ VISKOZITY	19
1.3.1 Pádové (tělískové) viskozimetry	19
1.3.2 Průtokové viskozimetry	19
1.3.3 Rotační viskozimetry	20
1.3.4 Vibrační viskozimetry	22
1.4 ELEKTRICKÁ VODIVOST	23
1.4.1 Elektrická vodivost kapalných izolantů	24
1.4.2 Závislost elektrické vodivosti a dynamické viskozity na teplotě	28
1.4.3 Závislost elektrické vodivosti na struktuře kapalného izolantu	30
1.5 METODY MĚŘENÍ ELEKTRICKÉ VODIVOSTI	31
1.5.1 Voltampérova metoda	31
1.5.2 Metoda Wheatstonova můstku	32
1.5.3 Kompenzační metoda	32
1.6 STÁRNUTÍ DIELEKTRICKÝCH MATERIÁLŮ	34
1.6.1 Tepelné stárnutí	34
1.6.2 Elektrické stárnutí	35
2 PRAKTICKÁ ČÁST	36
2.1 ZKUŠEBNÍ VZORKY	36
2.2 STÁRNUTÍ VZORKŮ	38
2.2.1 Tepelné stárnutí	38
2.2.2 Elektrické stárnutí	38
2.3 VÝSLEDKY A VYHODNOCENÍ HUSTOTY	40
2.4 VÝSLEDKY A VYHODNOCENÍ DYNAMICKÉ VISKOZITY	42
2.5 VÝSLEDKY A VYHODNOCENÍ ELEKTRICKÉ VODIVOSTI	48
ZÁVĚR.....	57
LITERATURA	59
SEZNAM SYMBOLŮ.....	61

Seznam obrázků

OBR. 1: RYCHLOSTNÍ PROFIL NEWTONOVSKÉ KAPALINY	16
OBR. 2: SCHÉMA HÖPPLEROVA KULIČKOVÉHO VISKOZIMETRU (PŘEVZATO Z [18])	19
OBR.3: SCHÉMA PRŮTOKOVÝCH (KAPILÁRNÍCH) VISKOZIMETRŮ. A) ÜBBELOHDEŮV B) CANNON-FENSKE C), D) S NASTAVITELNÝM TLAKOVÝM SPÁDEM (PŘEVZATO Z [18])	20
OBR. 4: SCHÉMA ZÁKLADNÍCH TYPŮ USPOŘÁDÁNÍ ROTAČNÍCH VISKOZIMETRŮ (PŘEVZATO Z [18]).....	21
OBR. 5: PRINCIP VIBRAČNÍHO MĚŘENÍ VISKOZITY (PŘEVZATO Z [15]).....	22
OBR. 6: REDUKOVANÝ PÁSOVÝ MODEL ENERGÍ ELEKTRONŮ	24
OBR. 7: VOLTAMPÉROVÁ CHARAKTERISTIKA EXTRÉMNĚ ČISTÝCH KAPALNÝCH IZOLANTŮ	25
OBR. 8: VOLTAMPÉROVÁ CHARAKTERISTIKA TECHNICKY ČISTÝCH KAPALNÝCH IZOLANTŮ	25
OBR. 9: VYSVĚTLENÍ DYNAMICKÉ VISKOZITY	28
OBR. 10: VOLTAMPÉROVA METODA PRO MĚŘENÍ ODPORU	31
OBR. 11: METODA WHEATSTONOVA MŮSTKU	32
OBR. 12: PRINCIP KOMPENZAČNÍ METODY	33
OBR. 13: ZÁVISLOST HUSTOTY NA TEPLITĚ	41
OBR. 14: PROGRAM PRO MĚŘENÍ DYNAMICKÉ VISKOZITY	44
OBR. 15: ZÁVISLOST LOGARITMU DYNAMICKÉ VISKOZITY NA PŘEVŘÁCENÉ HODNOTĚ TEPLoty OLEJE ESTO BNX.....	45
OBR. 16: ZÁVISLOST LOGARITMU DYNAMICKÉ VISKOZITY NA PŘEVŘÁCENÉ HODNOTĚ TEPLoty OLEJE RENOLIN ELTEC	45
OBR. 17: ZÁVISLOST LOGARITMU DYNAMICKÉ VISKOZITY NA PŘEVŘÁCENÉ HODNOTĚ TEPLoty OLEJE MIDEL 7131	46
OBR. 18: ZÁVISLOST LOGARITMU DYNAMICKÉ VISKOZITY NA PŘEVŘÁCENÉ HODNOTĚ TEPLoty OLEJE MIDEL 7131 PO ELEKTRICKÉM NAMÁHÁNÍ	46
OBR. 19: ZÁVISLOST LOGARITMU DYNAMICKÉ VISKOZITY NA PŘEVŘÁCENÉ HODNOTĚ TEPLoty OLEJE MIDEL 7131 PO TEPELNÉM STÁRNUTÍ NAMÁHÁNÍ	47
OBR. 20: ZÁVISLOST DYNAMICKÉ VISKOZITY NA TEPLITĚ.....	47
OBR. 21: SCHÉMA MĚŘÍČÍHO SYSTÉMU TETTEX 2903 (PŘEVZATO Z [10]).	48
OBR. 22: ZÁVISLOST LOGARITMU ELEKTRICKÉ VODIVOSTI NA PŘEVŘÁCENÉ HODNOTĚ TEPLoty OLEJE ESTO BNX.....	50
OBR. 23: ZÁVISLOST LOGARITMU ELEKTRICKÉ VODIVOSTI NA PŘEVŘÁCENÉ HODNOTĚ TEPLoty OLEJE RENOLIN ELTEC	50
OBR. 24: ZÁVISLOST LOGARITMU ELEKTRICKÉ VODIVOSTI NA PŘEVŘÁCENÉ HODNOTĚ TEPLoty OLEJE MIDEL 7131	51
OBR. 25: ZÁVISLOST LOGARITMU ELEKTRICKÉ VODIVOSTI NA PŘEVŘÁCENÉ HODNOTĚ TEPLoty OLEJE MIDEL 7131 PO ELEKTRICKÉM NAMÁHÁNÍ	51
OBR. 26: ZÁVISLOST LOGARITMU ELEKTRICKÉ VODIVOSTI NA PŘEVŘÁCENÉ HODNOTĚ TEPLoty OLEJE MIDEL 7131 PO TEPELNÉM NAMÁHÁNÍ.....	52
OBR. 27: ZÁVISLOST ELEKTRICKÉ VODIVOSTI NA ČASE PŘI RŮZNÝCH TEPLITÁCH OLEJE ESTO BNX	52
OBR. 28: ZÁVISLOST ELEKTRICKÉ VODIVOSTI NA ČASE PŘI RŮZNÝCH TEPLITÁCH OLEJE RENOLIN ELTEC	53
OBR. 29: ZÁVISLOST ELEKTRICKÉ VODIVOSTI NA ČASE PŘI RŮZNÝCH TEPLITÁCH OLEJE MIDEL 7131	53
OBR. 30: ZÁVISLOST ELEKTRICKÉ VODIVOSTI NA ČASE PŘI RŮZNÝCH TEPLITÁCH OLEJE MIDEL 7131 PO ELEKTRICKÉM NAMÁHÁNÍ.....	54

OBR. 31: ZÁVISLOST ELEKTRICKÉ VODIVOSTI NA ČASE PŘI RŮZNÝCH TEPLITÁCH OLEJE MIDEL 7131 PO TEPELNÉM NAMÁHÁNÍ	54
OBR. 32: APLIKACE WALDENOVA ZÁKONA PRO JEDNOTLIVÉ VZORKY OLEJE	55
OBR. 33: APLIKACE WALDENOVA ZÁKONA PRO OLEJ MIDEL 7131 PŘED A PO TEPELNÉM A ELEKTRICKÉM NAMÁHÁNÍ	55
OBR. 34: ZÁVISLOST ELEKTRICKÉ VODIVOSTI NA TEPLITĚ	56

Seznam tabulek

TAB. 1 :	VLASTNOSTI MINERÁLNÍHO OLEJE ESTO BNX [24]	36
TAB. 2 :	VLASTNOSTI MINERÁLNÍHO OLEJE RENOLIN ELTEC [22]	36
TAB. 3 :	VLASTNOSTI MINERÁLNÍHO OLEJE MIDEL 7131 [23].....	37
TAB. 4 :	PRŮRAZNÁ NAPĚTÍ	38
TAB. 5 :	NAMĚŘENÉ HODNOTY HUSTOTY	40
TAB. 6 :	VYPOČÍTANÉ HODNOTY HUSTOTY	41
TAB. 7 :	PARAMETRY SKLENĚNÉ A KOVOVÉ KULIČKY	42
TAB. 8 :	ZMĚŘENÉ A VYPOČÍTANÉ HODNOTY DYNAMICKÉ VSKOZITY OLEJE ESTO BNX..	42
TAB. 9 :	ZMĚŘENÉ A VYPOČÍTANÉ HODNOTY DYNAMICKÉ VSKOZITY OLEJE RENOLIN ELTEC	42
TAB. 10 :	ZMĚŘENÉ A VYPOČÍTANÉ HODNOTY DYNAMICKÉ VSKOZITY OLEJE MIDEL 7131	43
TAB. 11 :	ZMĚŘENÉ A VYPOČÍTANÉ HODNOTY DYNAMICKÉ VSKOZITY	43
TAB. 12 :	TECHNICKÉ PARAMETRY PŘÍSTROJE TETTEX 2903 [10].....	48
TAB. 13 :	HODNOTY MINUTOVÉ ELEKTRICKÉ VODIVOSTI PRO 500 V PŘI RŮZNÝCH TEPLITÁCH 49	
TAB. 14 :	VYPOČÍTANÉ HODNOTY NÁSOBKU ELEKTRICKÉ VODIVOSTI A DYNAMICKÉ VSKOZITY	49

Úvod

Použití kapalných izolačních médií v elektrotechnice je mnohostranné. Pro jejich velkou elektrickou pevnost nebo tekutost lze použít jako izolační a chladičové média v transformátorech, nebo jako náplně do kondenzátorů, kde slouží k impregnaci papírového dielektrika. Nejlepším izolačním médiem v oblasti energetiky pro elektrické přístroje vysokého napětí a velmi vysokého napětí jsou jednoznačně minerální izolační oleje na bázi ropy. Zásoby ropy ubývají a minerální izolační oleje bude třeba nahradit nebo alespoň omezit jejich spotřebu. Proto je třeba hledat vhodné kapalné izolanty, které by ropné produkty nahradily. Při konstrukci elektrických přístrojů se již na počátku 19. století využívaly přírodní rostlinné izolační oleje pro nízké napětí a vysoké napětí. Jednalo se o oleje rostlinného původu - oleje linné nebo lisované z řepky olejné. Tyto přírodní kapaliny se lépe biologicky odbourávají a v případě existence technického řešení a vhodnosti použití, by mohly být prosazovány zejména z hlediska ochrany životního prostředí. Současně s rostoucí spotřebou ropných produktů na světovém trhu vznikaly i první výrobky syntetických izolačních olejů. První typy těchto olejů se dostaly na trh a začaly se používat v druhé polovině 20. století. Některé oleje podle jejich vlastností by mohly být využívány i v elektroizolační technice, zejména pro jejich dobrou biologickou odbouratelnost. Použití těchto olejů by byla v některých případech omezená jen na nižší napětí, ale i to je určitou nadějí pro snížení spotřeby ropných olejů. Jejich vhodnost v oblasti elektroizolační techniky je nutné nejprve řádně ověřit laboratorně. U izolačních kapalin se určují tyto základní jakostní parametry: barva kapalných izolačních médií, hustota, viskozita, bod vzplanutí, bod tuhnutí, obsah vody, usazeniny a rozpustné látky, elektrická pevnost, vnitřní rezistivita, ztrátový činitel, relativní permitivita aj.

Tato práce se zabývá měřením a vyhodnocováním elektrické vodivosti a dynamické viskozity izolačních kapalin pomocí různých diagnostických metod.

1 Teoretická část

1.1 KapalnÉ izolanty

1.1.1 Minerální oleje

Minerální oleje používáme v elektrotechnických zařizéních jako izolační, impregnační, chladicí a případně jako zhášecí medium. Vyznačují se velmi dobrými technickými vlastnostmi a nízkou cenou, kterými jiné kapalnÉ izolanty nemohou konkurovat. Proto jsou minerální oleje nejpoužívanějšími kapalnými izolanty.

Získávají se z lehkých olejů, zkondenzovaných při destilaci ropy. Minerální oleje jsou směsi různých uhlovodíků obsažených v ropě. Tyto uhlovodíky se dělí na tři hlavní skupiny:

- Parafinická (metanová, alkanická) obsahuje více než 66 % nasycených parafinických uhlovodíků obecného vzorce C_nH_{2n-2} .
- Naftenická (cyklanická) s více než 66 % nasycených naftenických uhlovodíků řady C_nH_{2n} bez dvojných vazeb.
- Aromatická s nenasycenými uhlovodíky C_nH_{2n-6} se střídavě dvojnými vazbami mezi atomy uhlíku.

Pro elektroizolační účely jsou nejvhodnější oleje z ropy s převládajícími nasycenými uhlovodíky parafinickými a naftenickými při malém množství aromatických.

Při postupném zpracování ropy po odstranění hrubých nečistot anorganických solí a vody se ropa podrobuje destilaci, a to nejdříve atmosférické, kde se odloučí benzínové, petrolejové a lehké olejové frakce. Zbývající mazut se pak dále destiluje ve vakuové věži při získání středních a těžkých olejů. Zbytek pak obsahuje nejtěžší olejové destiláty, vazelinu a asfalt.

Při destilaci získaný lehký olej se pak dále rafinuje, aby byl zneutralizován a zbaven polárních kyslíkatých sloučenin. Rafinace může být provedena chemicky při použití kyseliny sírové, která s nečistotami oleje vytvoří kal. Ten se odstraní odstředěním. Olej se dále neutralizuje a promývá. Jindy se provádí selektivní rafinace rozpouštědly, kterými se rozpouští nežádoucí složky. Závěrem rafinace je práškování, tj. čištění oleje při 130 °C rozemletou bělící hlinkou, kterou se odstraní zbytky polárních látek a nečistot. Stabilita olejů za provozu je ohrožená oxidací, proto se oleje stabilizují inhibitory, ty působí jako antioxidanty [5].

Podle použití se minerální oleje dělí na oleje transformátorové, kabelové a kondenzátorové.

Hlavní funkcí transformátorového oleje je zprostředkování dobrého odvodu tepla. Teplo se v oleji přenáší hlavně konvekcí, z čehož vyplývá požadavek, na jeho co nejnižší viskozitu. Oleje s nízkou viskozitou jsou velmi dobré k impregnaci papírové a vláknité izolaci v transformátorech. Nízkou viskozitu mají destilační produkty s nižším bodem varu. Obsahují však složky, které se při vyšších teplotách odpařují a jsou velmi hořlavé. Proto se pro transformátorové oleje předpisuje bod vzplanutí tj. minimální teplota, při které se nesmí z oleje uvolňovat hořlavé páry. Aby se zaručilo, že olej bude vyhovovat i při nejnižší teplotě, předpisují příslušné normy bod tuhnutí oleje. Stanovuje se jako teplota, za které olej ve zkumavce ztuhne natolik, že při naklonění zkumavky neteče.

Na kabelové oleje se kladou požadavky dle druhu vyráběného kabelu. Impregnační hmota, kterou se impregnuje papírová izolace kabelů běžného typu do 35 kV by měla mít, při provozních teplotách co největší viskozitu, aby nestékala z výše položených míst kabelu, což má za následek průrazy v místech, odkud hmota odtéká. Impregnace probíhá za teploty 115 až 130 °C. Viskozita musí být proto co nejnižší, aby se v co nejkratším čase a bez zvlášť

vysokého vakua dosáhlo dobré impregnace kabelové izolace. Používá se proto olej s co nejmenší teplotní závislostí viskozity.

Pro kondenzátory se používá oleje s podobnými vlastnostmi jako oleje kabelové [4].

1.1.2 Rostlinné oleje

Jsou ve svém složení směsí esterů, glycerinů a nenasycených mastných kyselin. Rostlinné oleje se dělí na:

- Nevysychavé, k nimž patří olej ricinový.
- Vysychavé, zastoupené olejem lněným, tungovým či dřevným.

Olej ricinový, získaný ze semen skočce, je tekutým polárním izolantem. Pro vysokou permitivitu a nejedovatost se používá k napouštění papírových kondenzátorů hlavně pro stejnosměrné obvody. Oleje druhé skupiny, tzv. vysychavé se chovají jako hmoty tvrditelné, tj. termoreaktivní, což se vyznačuje tím, že při působení tepla a světla ve styku se vzduchem přechází do tuhého stavu. Tenká vrstva oleje na naneseném povrchu vysychá a vytváří lesklou tvrdou hmotu dobrých elektrických vlastností, která pevně lpí na podkladu. Vysychání (schnutí oleje) není tedy odpařením části kapaliny, ale chemickým procesem při pohlcování kyslíku. Váha se nezmenší, ale naopak zvětší. Schnutí oleje je současnou oxidací a polymerací. Tuto vlastnost získává olej přítomností mastných kyselin, které mají nenasycené vazby. Filmy vysychavých olejů jsou stále proti působení rozpouštědel a odolávají v tepelném stavu těžším uhlovodíkům. Při zahřátí se film vysušeného oleje nezměkčí, a proto je můžeme pokládat za hmoty tvrditelné.

Lněný olej se získává ze semen lnu. Tungový či dřevný olej se získává ze semen tungového stromu. Dřevný olej je výhodnější než olej lněný, jelikož schne rychleji v poměrně tlustší vrstvě a nikoli jako lněný olej jen od povrchu, přičemž má jeho vrstva větší odolnost proti vnikání vody. Nevýhodou dřevného oleje je však jeho tepelné stárnutí, při kterém křehne, praská a odlupuje se od povrchu, na nějž byl nanesen.

Kromě dvou uvedených vysychavých olejů je možno při vhodném zpracování použít oleje ricinového. Další vysychavé oleje se získávají eterifikací mastných kyselin, vyrobených synteticky z minerálních olejů. V elektrotechnice používáme vysychavých olejů hlavně pro výrobu elektroizolačních laků [5].

1.1.3 Syntetické izolační kapaliny

Jako náhrada hořlavých minerálních olejů byly připraveny syntetické tekutiny, které se vedle nehořlavosti vyznačují dobrými elektrickými vlastnostmi. Podle složení lze syntetické tekutiny rozdělit na látky:

- Vzniklé polymerací nenasycených uhlovodíků. Při polymeraci nenasycených uhlovodíků butylénu i propylénu vznikají syntetické tekutiny o různých hodnotách viskozity. Nejvíce používané polybutylény, jako nepolární látky, vynikají stabilitou i při vysokých teplotách, mají dobré elektrické vlastnosti, nízké dielektrické ztráty, velký měrný odpor, elektrickou pevnost až 180 kV cm^{-1} , jsou odolné proti záření a oxidaci.
- Chlorované uhlovodíky. Z chlorovaných uhlovodíků, označovaných jako nehořlavé tekutiny, se používalo chlorovaných derivátů benzenu a bifenyly. Vlastnosti těchto hmot se mění stupněm jejich chlorování. Pro kondenzátory se používalo pentachlordifenyly. Pentachlordifenyl je polární dielektrikum s permitivitou 4,5 až 5. Viskozita pentachlordifenyly je značná a při 50°C ještě dvojnásobná proti transformátorovému oleji. Proto se čistého pentachlordifenyly nepoužívalo k plnění transformátorů, ale

smícháním s trichlorbenzenem se tekutina stává méně viskózní než je transformátorový olej. V ČR je známa tato tekutina pod názvem Delor. Výroba chlorovaných uhlovodíků v průběhu 20. století dosahovala milionů tun nejrůznějších sloučenin a dodnes představuje řada těchto produktů velkou ekologickou zátěž pro naši planetu. Řada sloučenin byla v době svého objevu pokládána za prakticky neškodné a teprve po mnohaletém masovém používání se ukázalo, že jejich dlouhodobé působení v přírodě může mít katastrofální následky, proto se v dnešní době nevyrábějí a stahují se z oběhu.

- Fluorované kapaliny (fluorokarbonáty). Fluorované sloučeniny mají oproti minerálním olejům mnohé vynikající vlastnosti. Vzhledem k vyšším hodnotám bodů tuhnutí vzniká při vyšších teplotách větší tlak par těchto sloučenin a pro snadnou možnost vypařování je potřeba uzavírat prostory, v nichž se vyskytují. Elektrickým průrazem vznikají kyseliny obsahující fluor a ty napadají izolační hmoty a kovy. Samotné fluorokarbonáty jsou velmi stále až do teplot 500 °C. Jsou-li suché, nenapadají kovy ani izolanty, avšak v přítomnosti vlhkosti působí korozivně na železo a lehce i na hliník a měď. Lze je použít pro náplně transformátorů a pro dobré zhášecí účinky pro výkonné spínače.
- Silikonové kapaliny. Významnou vlastností silikonových kapalin je jejich tepelná stálost v širokém rozmezí teplot i poměrně dobré izolační vlastnosti. Chemickým složením jsou silikonové kapaliny polymetyl nebo etylsiloxany. Přes dobré dielektrické vlastnosti se nemohou silikonové kapaliny používat k zhášení oblouku v elektrických vypínačích, neboť při vzniku oblouku se z nich zvolna vyvíjejí plyny [5].
- Organické estery jsou vyráběny chemickou syntézou a jejich struktura je uzavřena tak, aby byla odstraněna centra nestability v oblastech, ve kterých již ropné oleje nevyhovují. Některé jsou potom vhodné i jako kapalně elektroizolanty. V současné době je na trhu dostupný a v praxi využitelný například metylester kyseliny řepkového oleje (MEŘO). Svými vlastnostmi se hodí více jako automobilové palivo, ale s určitými úpravami ho lze použít jako izolant pro napětíovou hladinu nízkého napětí. Velmi podobné vlastnosti má i etylester řepkového oleje a jeho směs s ropnými uhlovodíky. Vzácně se objevují netoxické silikonové elektroizolační kapaliny, nemísitelné s jinými oleji. Na našem trhu jsou k dispozici některé syntetické esterové elektroizolační kapaliny, např. MIDEL 7131, ARAL 4569, SHELL FLUID 4600, vyznačující se vyšší cenou, dobrou biologickou odbouratelností, ale také vyšší hustotou, viskozitou a sníženou hořlavostí [19].

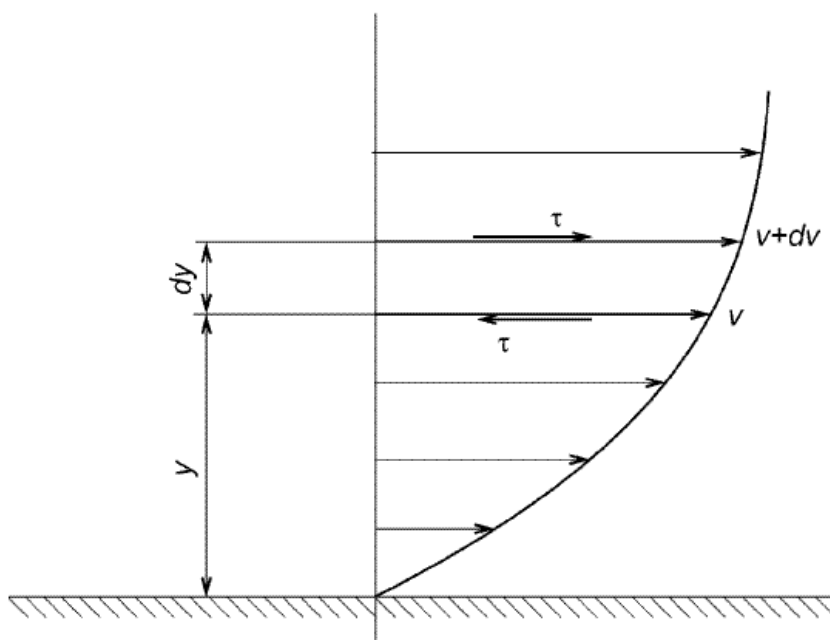
1.2 Dynamická viskozita

Viskozita kapalin se projevuje při jejich pohybu. Pohybují-li se sousední vrstvy kapaliny různými rychlostmi, vzniká na jejich rozhraní smykové napětí, které brání pohybu. Zmenšení rychlosti je způsobeno tečnou silou, která je vyvolána vnitřním třením nebo viskozitou či vazkostí kapaliny. Třecí síla a tím i tečné (smykové) napětí τ (podíl tečné síly a velikosti styčné plochy) jsou nenulové. Tečné napětí, které je kompenzováno proměnnou rychlostí kapaliny, je tím větší, čím více se mění rychlost od vrstvy k vrstvě. Změnu rychlosti, kterou bychom pozorovali při postupu od vrstvy k vrstvě kolmo ke směru proudění (obr. 1), můžeme charakterizovat gradientem rychlosti ve směru kolmém k proudu tj. podílem dv/dy . Při tzv. laminárním proudění, při němž probíhají proudová vlákna souběžně, a kapalina se nepromíchává, je tečné napětí úměrné gradientu rychlosti

$$\tau = \eta \frac{dv}{dy}, \quad (1)$$

kde η je dynamická viskozita kapaliny [6]. Kapaliny, pro které platí vztah (1) nazýváme newtonovské. Podíl dynamické viskozity a hustoty kapaliny nazýváme kinetickou viskozitou

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}. \quad (2)$$



Obr. 1: Rychlostní profil newtonovské kapaliny

Viskozita každé tekutiny závisí na teplotě a tlaku. Z rostoucí teplotou viskozita klesá a rostoucím tlakem vzrůstá. Závislost viskozity na teplotě při stálém tlaku lze popsat vztahem

$$\eta = \exp\left(A + \frac{B}{T}\right), \quad (3)$$

kde T je termodynamická teplota, A , B jsou empirické materiálové konstanty.

Ke stanovení viskozity využíváme závislosti mezi dynamickými a kinematickými veličinami, jimiž je charakterizováno proudění kapalin. Pro měření viskozity se používá viskozimetry založené na Poiseuilleově a Stokesově vztahu [16].

1.2.1 Poiseuilleův vztah

Proudí-li newtonovská kapalina malou rychlostí úzkou trubicí, je rozložení vektoru rychlosti v osovém řezu parabolické a proudění je laminární. Za těchto podmínek odvodil Poiseuille vztah

$$V = \frac{\pi r^4}{8\eta} \frac{\Delta p}{l} t, \quad (4)$$

kde V je objem kapaliny, t čas, Δp úbytek tlaku, l délka trubice o poloměru r .

Proudí-li kapalina o hustotě ρ kapilárou o délce l účinkem vlastního hydrostatického tlaku, lze tlakový úbytek Δp , odpovídající vnitřnímu tření v kapalině, určit z hydrostatického tlakového rozdílu, zmenšeného o kinetickou energii objemové jednotky v ústí kapiláry, podle Bernoulliho rovnice

$$\Delta p = \rho h g - \frac{1}{2} \rho v^2. \quad (5)$$

Pro střední rychlost proudění platí

$$\bar{v} = \frac{V}{\pi r^2 t}. \quad (6)$$

Dosazením rovnice (6) do vztahu (5) dostaneme pro dynamickou viskozitu

$$\eta = \rho \frac{\pi r^4}{8Vl} h g t - \frac{\rho V}{16\pi l t}. \quad (7)$$

1.2.2 Stokesův vztah

Při pohybu tělesa v kapalině klade kapalina jeho pohybu odpor, který je při pomalém proudění přímo úměrný rychlosti. Pro odpor, který klade kapalina o viskozitě η pohybu koule o poloměru r , odvodil Stokes z pohybové rovnice nestlačitelné kapaliny s vnitřním třením vztah

$$F = 6\pi\eta r v, \quad (8)$$

který platí pro nepříliš velké rychlosti pohybu koule, při nichž je obtékání laminární. Padá-li koule hustoty ρ_k v kapalině hustoty $\rho < \rho_k$, působí na ni tíhová síla zmenšená silou vztlakovou tj.

$$F' = mg - V\rho g = \frac{4}{3}\pi r^3(\rho_k - \rho)g, \quad (9)$$

která ji z počátku zrychluje. Proti ní však působí síla odporu F tím větší, čím větší je rychlost v . Ta bude teoreticky vzrůstat, až dosáhne jisté maximální hodnoty v_m , tzv. mezní rychlosti, při níž bude $F = F'$ a další pohyb koule bude rovnoměrný [16]. Mezní rychlost je tedy dána podmínkou

$$6\pi\eta r v_m = \frac{4}{3}\pi r^3(\rho_k - \rho)g. \quad (10)$$

Z rovnice (10) lze vypočítat dynamickou viskozitu

$$\eta = \frac{2}{9}g(\rho_k - \rho)\frac{r^2}{v_m}. \quad (11)$$

1.3 Metody měření dynamické viskozity

K měření viskozity se běžně používají viskozimetry průtokové založené na vztahu (4) resp. (7), pádové založené na vztahu (11) a rotační, jimiž se určuje viskozita na základě odporu, který klade kapalina otáčivému pohybu vhodně volených těles. Podmínkou správného měření je vždy laminárnost proudění v celém rozsahu měření a dobře definovaná geometrie toku v případě nenewtonovských kapalin.

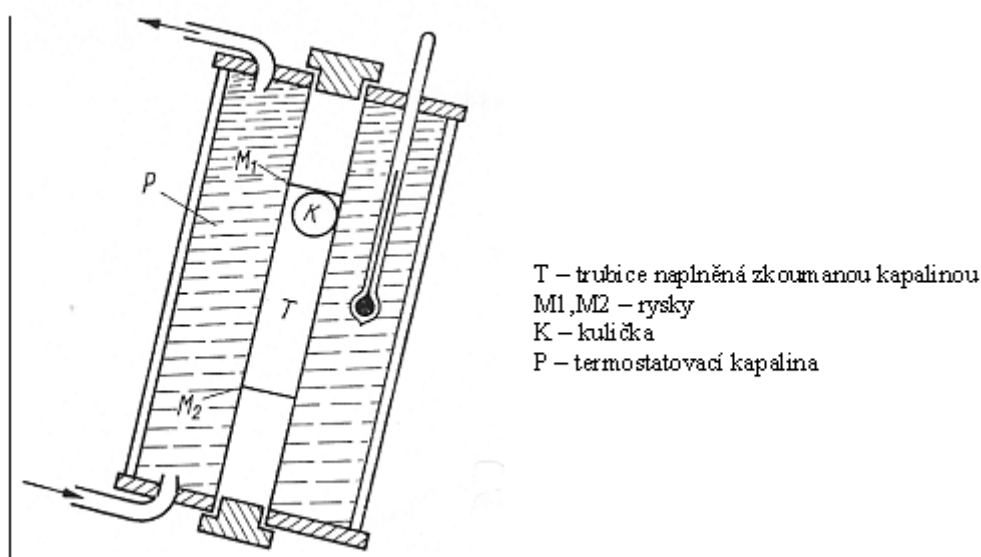
1.3.1 Pádové (tělískové) viskozimetry

Využívají k měření dynamické viskozity skutečnosti, že rychlost pádu tělíska v měrné válcové nádobě, naplněné měřenou kapalinou nebo plynem je závislá na viskozitě této tekutiny. Dynamická viskozita se určuje z doby pádu kuličky na dráze 100 mm (mezi ryskami M_1 a M_2). Všechny veličiny konstantní pro daný viskozimetr a kuličku jsou zahrnuty do tzv. konstanty kuličky. Dynamická viskozita se vypočítá dle vztahu

$$\eta = t(\rho_k - \rho)K, \quad (12)$$

kde t je doba pádu změřená mezi horní a spodní značkou, ρ_k hustota kuličky, ρ hustota kapaliny a K je konstanta kuličky.

Nejjednodušším tělískovým viskozimetrem je viskozimetr Stokesův. Jiným přístrojem této skupiny je technický viskozimetr Höpplerův v němž padá kulička skleněnou trubicí skloněnou od vertikály o 10° (obr. 2) [18].



Obr. 2: Schéma Höpplerova kuličkového viskozimetru (převzato z [18])

1.3.2 Průtokové viskozimetry

Měření těmito přístroji je založeno na Poiseuillově rovnici pro laminární tok kapaliny z kolmé trubice kruhového průřezu vlastní hmotností

$$\eta = \pi h \rho g \frac{t}{8} V l, \quad (13)$$

kde je r poloměr trubice, l délka trubice, h výška sloupce kapaliny, g tíhové zrychlení, t doba toku, V objem vyteklé kapaliny.

Aby proudění bylo laminární je nutno užívat při nízkých viskozitách kapilární trubice. V praxi se měření neprovádí absolutně, ale relativně na základě srovnání s referenční kapalinou mající známou viskozitu η_0 např. podle vztahu

$$\eta = \frac{t}{t_0} \eta_0, \quad (14)$$

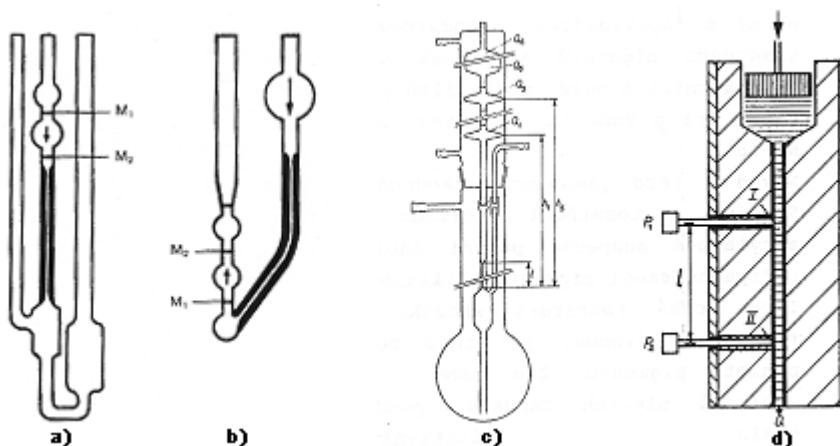
kde t_0 je doba výtoku referenční kapaliny.

Nejznámějšími typy jsou viskozimetr Englerův, Ostwaldův, Kohlův a Ubbelohdeův (obr. 3).

U kapilárních viskozimetrů s nastavitelným tlakovým spádem jsou přímo měřitelné veličiny objemový průtok V a tlakový spád Δp [18].

Dynamickou viskozitu lze vypočítat dle vztahu

$$\eta = \frac{2\Delta p V}{\pi r^2}. \quad (15)$$



Obr. 3: Schéma průtokových (kapilárních) viskozimetrů. a) Ubbelohdeův b) Cannon-Fenske c), d) s nastavitelným tlakovým spádem (převzato z [18])

1.3.3 Rotační viskozimetry

Vzorek je podrobován smyku mezi dvěma definovanými plochami, z nichž jedna vykonává otáčivý pohyb a vyhodnocuje se brzdný účinek vzorku při různých rychlostech otáčení. Nejběžnější typ rotačního viskozimetru s dvěma souosými válci V_1 a V_2 , mezi kterými je měrná kapalina K , je schematicky znázorněn na obr. 4. Jeden z válců (v tomto případě vnější) se při měření uvede do rotačního pohybu stálou úhlovou rychlostí ω a registruje se moment síly M působící přitom na vnitřní válec V_2 . V uvedeném případě se měří stočení torzního vlákna T , na kterém je zavěšen válec V_1 metodou světelného paprsku odráženého zrcátkem Z . V komerčních přístrojích se otáčivý moment měří zpravidla elektronicky, což umožňuje jeho další snadné zpracování eventuálně zápis.

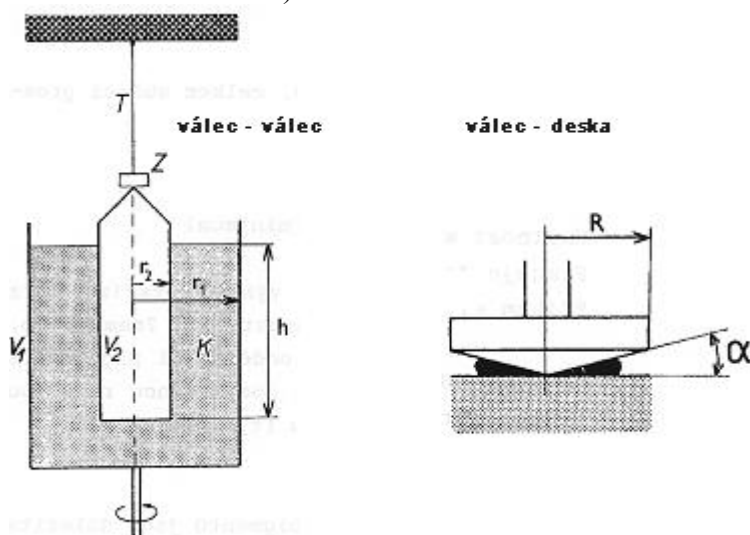
Jsou-li poloměry válců r_1 , r_2 a výška smýkané vrstvy kapaliny h , lze vypočítat viskozitu podle rovnice

$$\eta = \frac{M (1/r_1^2 - r_2^2)}{4\pi h \omega} = C \frac{M}{\omega}, \quad (16)$$

kde C je přístrojová konstanta.

Rovnice byla odvozena za předpokladu stabilního laminárního toku ve štěrbině a při zanedbání koncových a hranových efektů. Pro eliminaci jejich vlivu byla navržena řada korekcí. Určité problémy vyvolává také skutečnost, že v různých bodech měřené kapaliny ve válcové mezeře je různá rychlost smykové deformace (běžně 20% mezi oběma povrchy). Dále je nutno počítat s ohřevem vzorku během měření, který se zvyšuje s viskozitou a rychlostí otáčení.

Místo dvou souosých válců se pro více viskózní kapaliny často užívá uspořádání kužel - deska. V obou případech se měřená kapalina dává do úzké štěrbiny mezi dvě plochy, takže při měření se vystačí s malým množstvím kapaliny ($\approx 0,1$ ml). V tomto případě je celý vzorek podroben konstantní rychlosti smykové deformace a jsou potlačeny koncové a krajové efekty. Nevýhodou je omezená použitelnost tohoto systému pro suspenze a disperze (větší částice narušují poměry toku v klínové mezeře).



Obr. 4: Schéma základních typů uspořádání rotačních viskozimetrů (převzato z [18])

Vztah mezi smykovým napětím τ a momentem síly M je pro uspořádání kužel - deska s poloměrem podstavy kužele r dán rovnicí

$$\tau = \frac{3M}{2\pi r^3}, \quad (17)$$

a pro gradient rychlosti platí

$$D = \frac{\omega}{\alpha}, \quad (18)$$

kde α je úhel štěrbiny.

Dynamickou viskozitu potom spočteme

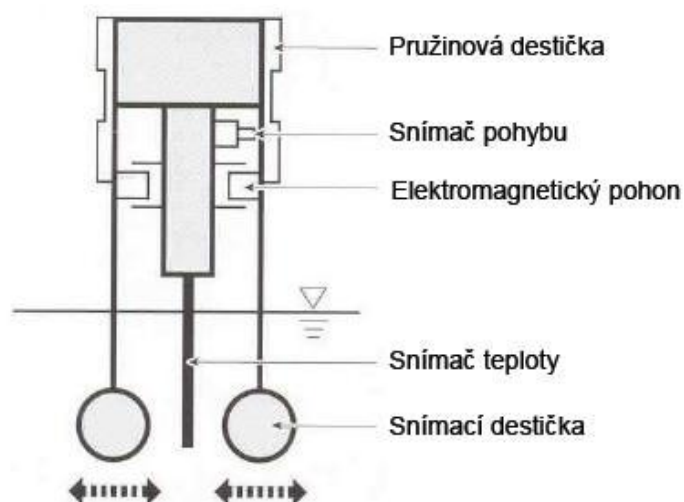
$$\eta = \frac{\tau}{D} = \frac{3M \cdot \alpha}{2\pi R \omega^3} = K \frac{M}{\omega}, \quad (19)$$

Rotačním viskozimetrem lze určovat viskozitu také tím způsobem, že se nechá vnitřní válec konat torzní kmity uvnitř stojícího vnějšího válce, když se předtím vhodně upraví velikost jeho momentu setrvačnosti. Mluvíme potom o viskozimetru torzním. Viskozita se určí měřením útlumu kmitů kmitajícího válce [18].

1.3.4 Vibrační viskozimetry

Jedná se o zcela unikátní vibrační metodu, která měří viskozitu detekcí elektrického proudu nutného k rezonanci dvou snímacích destiček, kmitajících proti sobě konstantní frekvencí 30 Hz a amplitudě nižší než 1 mm. Elektromagnetický pohon kontroluje vibraci snímacích destiček pro udržení konstantní amplitudy. Velikost proudu potřebná pro buzení kmitů předepsané frekvence a amplitudy je pak převáděna na hodnotu viskozity. Mezi výhody těchto viskozimetrů patří:

- Vysoká přesnost měření – Při opakovaném měření je odchylka naměřených hodnot maximálně 1 %.
- Kontinuální měření – Vibrační metoda způsobuje minimální změnu struktury vzorků kapaliny a dovolí měření bodu zákalu a změny povrchových rozhraní např. smáčivost. Díky možnosti měření v širokém rozsahu bez výměny snímacích destiček je možné provádět kontinuální měření.
- Malé množství měřeného vzorku – Pro měření stačí pouze 35ml vzorku.
- Měření pěnivých vzorků – Nízká frekvence a amplituda snímače umožňuje měření pěnivých vzorků s malým vlivem na tvorbu pěny [14].



Obr. 5: Princip vibračního měření viskozity (převzato z [15])

1.4 Elektrická vodivost

O elektrické vodivosti prostředí můžeme mluvit tehdy, pokud se v něm můžou pohybovat volné elektrické náboje při působení elektrického pole. Vodivost γ je určena počtem n volných nábojů q v jednotce objemu a jejich pohyblivostí b :

$$\gamma = nqb, \quad (20)$$

přičemž pohyblivost nábojů je definována jejich rychlostí v při jednotkové intenzitě elektrického pole E :

$$b = \frac{v}{E}. \quad (21)$$

Pokud je v látce přítomno více druhů nosičů elektrických nábojů různé koncentrace, pohyblivosti a velikosti náboje, je výsledná vodivost materiálu dána součtem příspěvků od jednotlivých typů nosičů.

Hodnoty vodivosti izolačních materiálů jsou menší než $10^{-8} \text{ S cm}^{-1}$ na rozdíl od vodivosti polovodičů 10^{-8} až 10^2 S cm^{-1} a vodičů 10^2 až 10^6 S cm^{-1} .

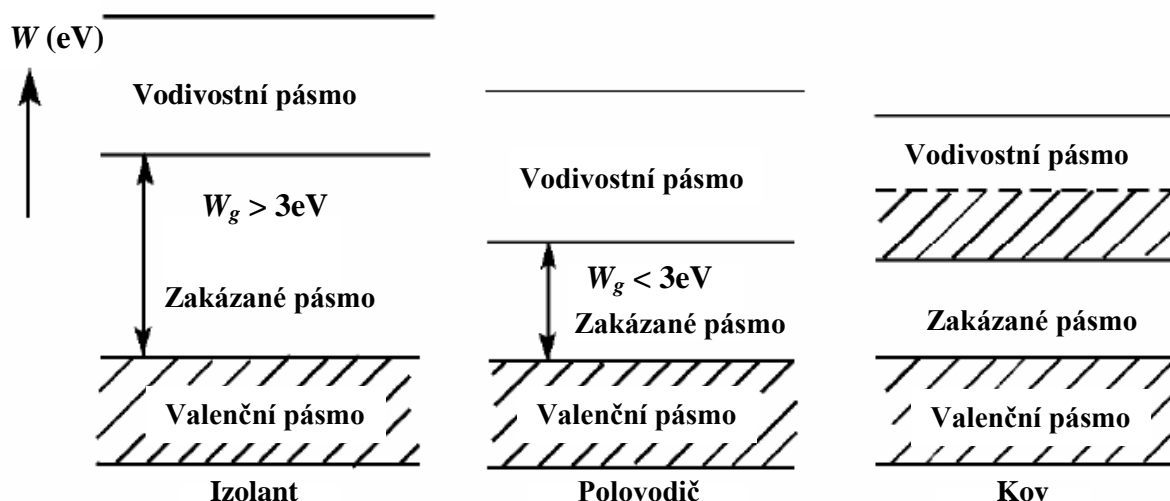
Elektrickou vodivost můžeme rozdělit podle typu nosičů elektrického náboje. Pak se jedná o elektrickou vodivost elektronovou, děrovou, protonovou, iontovou a elektroforetickou. Elektrický náboj je v prvních případech přenášen prostřednictvím elementárních částic nebo iontů, v případě elektroforetické vodivosti pak koloidními částicemi (větší skupiny částic).

O možnosti výskytu elektronové resp. děrové vodivosti pevných látek znázorňuje tzv. pásový model energií elektronů. Kov je charakterizován tím, že má buď neúplně obsazený poslední nejvyšší energetický pás, jak je znázorněno na obr. 6., nebo se poslední plně zaplněný energetický pás překrývá s nejbližším vyšším pásem dovolených energií. Elektrony v kovu mohou přijmout libovolně malou energii již při nejnižších teplotách a přispívat tak k jeho vodivosti. U polovodičů je vodivostní pásmo odděleno zakázaným pásmem šířky $W_g < 3\text{eV}$. Aby byl polovodič schopný vést elektrický proud, je zapotřebí dodat elektronům ve valenčním pásmu energii větší nebo rovnou šířce zakázaného pásu W_g . V izolantech je šířka zakázaného pásu $W_g > 3\text{eV}$.

Při důkladném studiu vodivosti pevných a kapalných izolačních materiálů (bez povšimnutí kapacitních efektů) lze pozorovat po přiložení elektrického pole v izolantu proud, jehož hodnota se zmenšuje v závislosti na čase. Po dostatečně dlouhém čase pozorovaný přechodný proud dosáhne ustálené hodnoty. Hustota ustáleného proudu I je určena ustálenou vodivostí γ a intenzitou elektrického pole E :

$$I = \gamma E. \quad (22)$$

Analogicky hovoříme o přechodné vodivosti, kterou odvozujeme z přechodného proudu I . Odčítáním ustálené složky od hustoty přechodného proudu dostaneme hustotu absorpčního proudu I_a . Když po dosažení ustáleného stavu přestane působit elektrické pole, směr proudu se obrátí a tento tzv. resorpční proud v závislosti na čase má stejný průběh jako záporně vzatý absorpční proud [4].



Obr. 6: Redukovaný pásový model energií elektronů

Pro praktické účely se používá hodnoty měrného elektrického odporu a měrné elektrické vodivosti. Měrný tj. na jednotku objemu přepočítaný odpor či vodivost jsou účelné zejména z hlediska možností srovnávat mezi sebou jednotlivé materiály. Vzájemný vztah obou zmíněných veličin je

$$\gamma = \frac{1}{\rho}. \quad (23)$$

Číselně je hodnota rezistivity ρ rovna odporu krychle o hraně 1 m daného materiálu, protéká-li proud mezi dvěma jejími protilehlými stěnami. Pro plochý vzorek, při předpokladu homogenního pole, vyjádříme měrný elektrický odpor

$$\rho = R \frac{S}{h}, \quad (24)$$

kde je S plocha elektrod, h tloušťka vzorku, R hodnota změřeného tzv. izolačního elektrického odporu.

Z pohledu elektroizolační techniky potřebujeme materiály bez volných nosičů elektrického náboje a bez znečištění a příměsí. Ty jsou příčinou toho, že každý technický izolant má určitou nenulovou elektrickou vodivost. Vznik a pohyb volných nosičů náboje záleží na skupenství látek [2].

1.4.1 Elektrická vodivost kapalných izolanů

Elektrická vodivost kapalných izolanů souvisí s jejich strukturou, obsahem nečistot a příměsí. Rozlišujeme proto extrémně čisté kapalně izolanty a tzv. technicky čisté kapaliny.

Extrémně čisté kapalně izolanty se vyznačují konduktivitou 10^{-14} až $10^{-15} \text{ S.m}^{-1}$ způsobenou volnými nosiči elektrického náboje. Ty mohou vzniknout některým z následujících způsobů:

- ionizací neutrálních molekul působením ionizujícího činidla např. záření
- disociací molekul vlastní kapaliny a případných stopových množství molekul příměsí
- tepelnou excitaci elektronů
- emisí elektronů z katody

Důsledkem zvýšené koncentrace volných nosičů elektrického náboje mají technicky čisté izolanty hodnotu konduktivity 10^{-11} do 10^{-12} Sm^{-1} . Tyto volné nosiče jsou různého charakteru a závisí na druhu příměsí, velikosti přítomných částic a stupni jejich disociace.

V technicky čistých kapalných izolantech se vyskytuje iontová a elektroforetická vodivost.

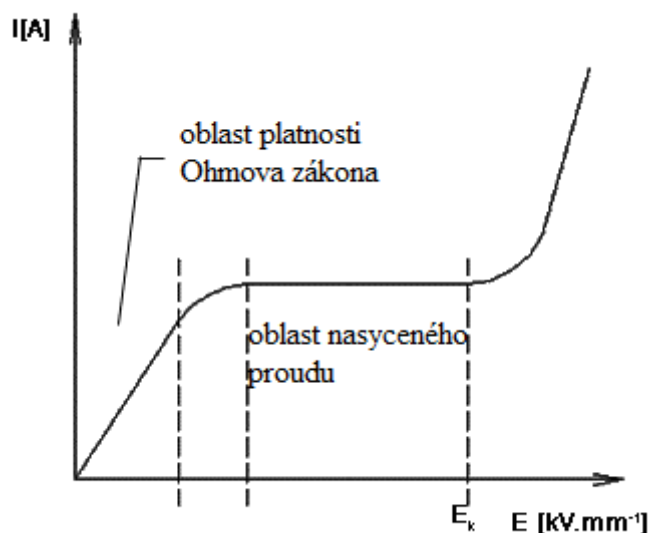
Odlišnosti v chování extrémně a technicky čistých kapalných izolantů ukazují voltampérové charakteristiky na obr. 7 a obr. 8.

U extrémně čistých kapalných izolantů se vyskytuje oblast nasyceného proudu, u technicky čistých izolantů tato část chybí.

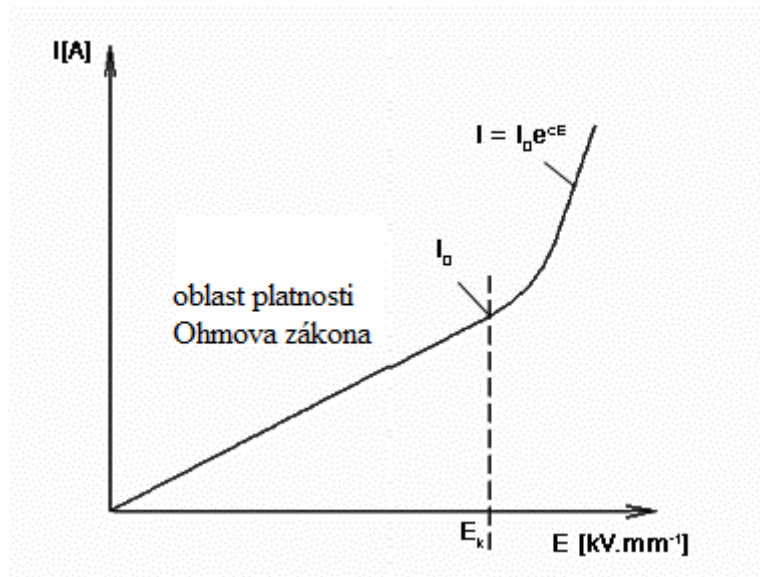
Od určité hodnoty E_k se působením elektrického pole podstatně zvětší počet volných nosičů nábojů, proto již nebude platit Ohmův zákon a při $E > E_k$ bude proud exponenciálně vzrůstat dle vztahu

$$I \cong I_0 \exp(CE_k), \quad (25)$$

kde je I_0 proud při E_k , C konstanta, závislá na vzdálenosti elektrod.



Obr. 7: Voltampérová charakteristika extrémně čistých kapalných izolantů



Obr. 8: Voltampérová charakteristika technicky čistých kapalných izolantů

Exponenciální růst proudu v silných elektrických polích může mít různé příčiny, jako zvětšení pohyblivosti iontů, zvětšení disociace molekul, studenou emisi s katody nebo nárazovou ionizaci [1].

U kapalných izolantů se vyskytuje vlastní a nevlastní iontová vodivost.

Vlastní elektrická vodivost je způsobena pohybem iontů, které vznikly v důsledku disociace molekul vlastního kapalného izolantu. Stupeň disociace kapaliny závisí na relativní permitivitě kapalného izolantu. Polární kapaliny mají vyšší stupeň disociace než kapaliny nepolární.

Nevlastní elektrická vodivost je způsobená přítomnými disociovanými příměsemi a vyskytuje se ve všech technicky čistých kapalných izolantech. Stupeň disociace molekul příměsí závisí především na jejich struktuře a koncentraci.

U kapalných izolantů se uplatňují silnější interakce molekul než ve struktuře plynů (slabší než ve struktuře pevných látek), dochází k vzniku nadmolekulární struktury tzv. klastrů. Vlivem tepelného pohybu částic, které má obecně rotační a translační složku, se vazby mezi molekulami neustále přerušují, aby posléze vznikly na jiném místě mezi jinými molekulami. Pro uplatnění translačního pohybu, musí být v blízkosti uvažované molekuly místo, do něhož může přeskóčit. Rovněž musí molekula získat dostatek energie pro překonání energetické bariéry mezi oběma místy.

K pohybu iontu v kapalném izolantu vyvolaným vlivem vnějšího elektrického pole, může dojít i tak, že se iont zachytí na molekule a vytvoří s ní celek. Vlivem tepelného pohybu je však určitá pravděpodobnost, že iont se od molekuly odtrhne. Při tomto odtržení musí iont překonat vazební síly, které ho k molekule váží. Energie těchto vazeb vytváří potenciálovou bariéru W rovnající se tzv. aktivační energii. Po odtržení může iont vykonat pohyb, omezený volnou dráhou l , jejíž velikost je srovnatelná s rozměry molekul.

Pro popis pohybu volného iontu kapalným izolantem lze použít model dvojité potenciálové jámy. Pravděpodobnost přeskoku iontu z jedné možné rovnovážné polohy do druhé je dána Boltzmannovým rozdělením

$$P(A \rightarrow B) \approx \exp\left(-\frac{W}{kT}\right), \quad (23)$$

kde je W výška potenciálové bariéry, která rozděluje obě rovnovážné polohy vzdálené od sebe o vzdálenost l , k Boltzmannova konstanta, T termodynamická teplota.

Na základě této pravděpodobnosti lze určit počet přeskoků z , které připadají na jeden iont za jednu sekundu ve vnějším elektrickém poli o intenzitě E

$$z = \frac{f_0 q l}{6kT} E \exp\left(-\frac{W}{kT}\right), \quad (24)$$

kde je f_0 kmitočet vlastních tepelných kmitů okolo rovnovážných poloh, q náboj iontu.

Driftová (pomalá změna veličiny vyvolaná vnějším podnětem) pohyblivost iontu vyvolaná působícím elektrickým polem je dána vztahem

$$b = \frac{v}{E} = \frac{zl}{E} = \frac{f_0 q l^2}{6kt} \exp\left(-\frac{W}{kT}\right), \quad (25)$$

Driftová pohyblivost iontu není tedy závislá na intenzitě elektrického pole. To znamená, že v této části charakteristiky platí Ohmův zákon (pouze za podmínky působení slabého elektrického pole). Driftová pohyblivost v silných elektrických polích závisí na jeho intenzitě.

Pokud budeme předpokládat, že pohyblivost kladných i záporných iontů je stejná, lze konduktivitu kapalného izolantu určit ze vztahu (20).

Dosazením rovnice (25) do vztahu (20) dostaneme

$$\gamma = \frac{\eta f_0 q^2 l^2}{6kT} \exp\left(-\frac{W}{kT}\right). \quad (26)$$

Pokud položíme

$$\frac{\eta f_0 q^2 l^2}{6k} = A, \quad (27)$$

$$\frac{W}{k} = B, \quad (28)$$

jde vztah (26) přepsat do tvaru

$$\gamma = \frac{A}{T} \exp\left(-\frac{B}{T}\right). \quad (29)$$

Protože se výraz A/T mění s teplotou podstatně méně než exponenciální výraz, lze vztah (29) zjednodušit na tvar

$$\gamma = A' \exp\left(-\frac{B}{T}\right). \quad (30)$$

V úzkém intervalu teplot platí pro konduktivitu kapalných izolantů ještě následující vztah

$$\gamma = \gamma_0 \exp(C\vartheta), \quad (31)$$

kde je γ_0 hodnota konduktivity při teplotě 0°C , ϑ teplota [2].

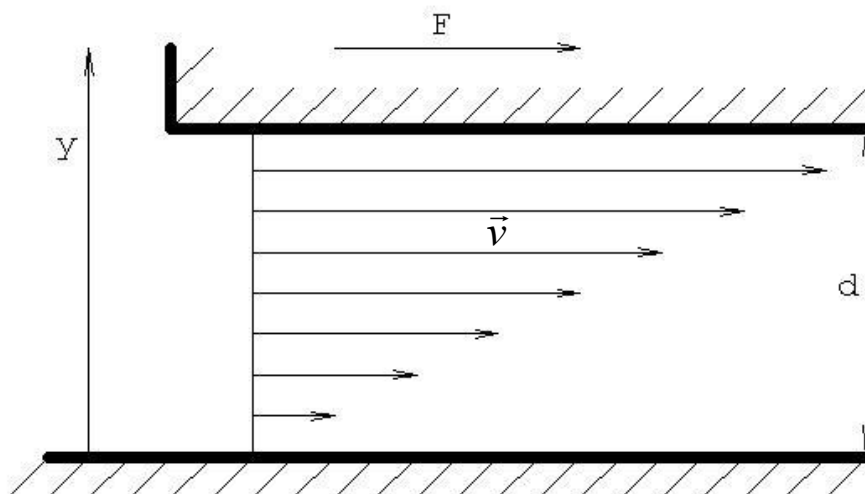
Elektroforetická vodivost se vyskytuje v systémech koloidních látek. Z koloidních soustav se u kapalných izolantů vyskytují dvě:

- emulze, tj. kapalně koloidní soustavy vznikající ze dvou kapalných fází, které se navzájem jen omezeně mísí, nebo se vůbec nemísí přičemž jedná fáze je v druhé koloidně rozptýlená.
- suspenze, tj. hrubé disperzní soustavy nerozpustných pevných látek jemně rozptýlených v kapalném dispergujícím prostředí.

Stálost emulzí a suspenzí se vysvětluje tím, že na koloidních částicích dispergované fáze jsou elektrické náboje. Po přiložení elektrického pole se elektricky nabitě koloidní částice dostanou do pohybu. Tento pohyb nabitých koloidních částic se nazývá elektroforéza. Elektrolytická vodivost se často vyskytuje v minerálních olejích, které obsahují emulgovanou vodu, v kapalných izolantech s makromolekulární přísadou nebo se zplodinami stárnutí. V praxi se elektroforetická vodivost vyskytuje společně s vodivostí iontovou. Obě složky vodivosti mohou být řádově stejné, popřípadě se elektroforetická vodivost může projevit intenzivněji.

1.4.2 Závislost elektrické vodivosti a dynamické viskozity na teplotě

Vodivost kapalných izolantů je velmi závislá na teplotě. Tato závislost je ovlivněna pohyblivostí volných nosičů elektrického náboje, které jsou rovněž závislé na teplotě. Pohyblivost volných nosičů elektrického náboje je spjata s dynamickou viskozitou kapaliny a s její závislostí na teplotě. Vztah mezi konduktivitou, viskozitou kapaliny a jejich závislosti na teplotě studoval experimentálně a později i teoreticky Walden.



Obr. 9: Vysvětlení dynamické viskozity

Vycházíme z dynamické viskozity, která charakterizuje vnitřní tření newtonovské kapaliny (obr. 9). Předpokládáme, že vrstva kapaliny se nachází mezi dvěma rovnoběžnými plochami. Spodní plocha je v klidu, na horní působí síla F a uděluje jí tak rychlost v_0

$$v_0 = \frac{1}{\eta} Fd, \quad (32)$$

kde je η dynamická viskozita kapaliny, d vzdálenost ploch, F síla vztahující se na jednotku plochy.

Vrstva kapaliny, která těsně přiléhá k horní ploše, má stejnou rychlost jako tato plocha. Od spodní nepohyblivé plochy k horní ploše se plynule mění rychlosti jednotlivých vrstev kapaliny od nuly do rychlosti v_0 . Pro rychlosti jednotlivých vrstev platí

$$v = \frac{v_0}{d} y. \quad (33)$$

Rozdíl rychlostí mezi jednotlivými vrstvami lze vyjádřit vztahem

$$v = \frac{v_0}{d} (y_2 - y_1). \quad (34)$$

Vzdálenosti molekul v kapalinách jsou úměrné jejich velikostem a vzdálenost jednotlivých vrstev odpovídá rozměru molekuly l (přibližná velikost volné dráhy). Potom lze (34) upravit na tvar

$$v = \frac{v_0}{d} l. \quad (35)$$

Na každou molekulu působí síla

$$f = Fl^2. \quad (36)$$

Odpovídající rychlost uspořádaného pohybu molekul vyvolaná touto silou bude dána vztahem:

$$v = bFl^2, \quad (37)$$

kde b je pohyblivost.

Ze vztahu (35) můžeme vyjádřit

$$v_0 = \frac{vd}{l}. \quad (38)$$

Dosazením do toho vztahu podle (37) a po dosazení do rovnice (32) dostaneme

$$v_0 = \frac{bFl^2d}{l} = \frac{1}{\eta}Fd. \quad (39)$$

Po úpravě dostaneme pro dynamickou viskozitu kapaliny

$$\eta = \frac{1}{bl}. \quad (40)$$

Pohyblivost molekul lze vyjádřit na základě následující rovnice

$$b = \frac{l^2 f_0}{6kT} \exp\left(-\frac{W}{kT}\right). \quad (41)$$

Po dosazení rovnice (41) do vztahu (40) dostaneme

$$\eta = \frac{6kT}{l^3 f_0} \exp\left(-\frac{W}{kT}\right). \quad (42)$$

Odvozené vztahy formálně platí jak pro molekuly, tak pro ionty, číselné hodnoty W , l a f_0 se však obecně liší. Indexem 1 jsou označeny veličiny vztahující se na ionty a indexem 2 veličiny vztahující se na molekuly. Potom lze psát

$$\eta = \frac{6kT}{l_2^3 f_{02}} \exp\left(-\frac{W_2}{kT}\right), \quad (43)$$

$$\gamma = \frac{nf_{01}q^2 l_1^2}{6kT} \exp\left(-\frac{W_1}{kT}\right). \quad (44)$$

Po úpravě dostaneme

$$\gamma\eta = \frac{nq^2}{l_2} \frac{l_1^2}{l_2^2} \frac{f_{01}}{f_{02}} \exp\left(-\frac{W_1 - W_2}{kT}\right). \quad (45)$$

Při rozboru tohoto vztahu můžou nastat tři možnosti:

- $W_1 > W_2$ – ionty jsou vázány s molekulami pevněji než samotné molekuly mezi sebou. Součin $\gamma \cdot \eta$ s rostoucí teplotou vzrůstá. Nastane i tehdy, když se s rostoucí teplotou zvětšuje koncentrace volných nosičů elektrického náboje – dochází k disociaci.

- $W_1 < W_2$ – vazby mezi molekulami jsou silnější než vazby iont – molekula. Součin $\gamma \cdot \eta$ s rostoucí teplotou klesá – pokles viskozity je rychlejší než nárůst konduktivity.
- $W_1 = W_2$ – oba druhy vazeb jsou přibližně stejně silné. Pokud platí $f_{01} = f_{02}$ a $l_1 = l_2$, má nárůst konduktivity γ a pokles dynamické viskozity η s teplotou totožný charakter. Za těchto okolností jsou splněny podmínky Waldenova pravidla ve tvaru

$$\gamma\eta = \frac{nq^2}{l} = konst. \quad (46)$$

Součin konduktivity a dynamické viskozity kapalného izolantu je konstantní a nezávisí na teplotě.

Waldenovo pravidlo neplatí v širším intervalu teplot a ve všech kapalných izolantech. Uplatňuje se v nepolárních kapalinách s minimálním obsahem příměsí a nečistot, ve kterých je vodivost způsobena pouze ionty vlastní kapaliny. Čím více se uplatňuje vodivost způsobená přítomností příměsí a nečistot, tím více se chování kapalného izolantu odklání od Waldenova pravidla. Waldenovo pravidlo lze formulovat i pro elektroforetickou vodivost kapalných izolantů [2].

1.4.3 Závislost elektrické vodivosti na struktuře kapalného izolantu

Podle chemických vazeb v molekulách kapalin dělíme kapalně izolanty na:

- 1) Kapaliny s kovalentními vazbami. Podle stupně polárnosti je dělíme na:
 - Nepolární – elektrická vodivost má iontový charakter, ionty vznikají disociací molekul nečistot a příměsí přítomných v kapalině. V případě koloidních soustav se navíc uplatňuje elektroforetická vodivost.
 - Polární – elektrická vodivost má rovněž iontový charakter. Ionty zde však nevznikají pouze disociací molekul příměsí a nečistot, ale i částečnou disociací molekul vlastního kapalného izolantu. Z toho důvodu je vodivost těchto izolantů větší než vodivost nepolárních kapalin.
 - Silně polární - jako izolanty je nelze použít, protože jejich molekuly částečně disociují na ionty. Ve velmi čistém stavu mají elektroizolační schopnosti.
- 2) Kapaliny s iontovými vazbami - jde o taveniny tuhých látek (solí) s iontovými vazbami nebo roztoky takových látek v ionizujícím rozpouštědle. Jsou to elektrolyty - vodiče druhé třídy. Dobře vedou proud, ale přitom se chemicky mění.
- 3) Kapaliny s kovovými vazbami – roztavené kovy nebo jejich slitiny – vodiče první třídy. Jako kapalně izolanty lze v praxi použít pouze kapaliny s molekulárními kovalentními vazbami, nevykazujícími příliš velký dipólový moment s permitivitou řádově do deseti.

1.5 Metody měření elektrické vodivosti

Elektrická vodivost jakožto převrácená hodnota vnitřní rezistivity závisí na vlhkosti, obsahu nečistot, ale také na teplotě a velikosti měřicího napětí. Pokud je hodnota rezistivity při teplotě 90 °C uspokojivá, avšak při teplotě okolí nikoliv, svědčí to o přítomnosti vody a cizích látek, které se vysrážely za studena. Měřením vnitřní rezistivity získáme informaci o stavu kapalného izolantu, především o tom zda obsahuje cizí složky a vodu. Vnitřní rezistivitu lze určit z proudu protékajícího vzorkem, který je zaznamenán pikoampérmetrem. Zkušební napětí má být uvedeno na konkrétní druhy kapalných izolantů. Měřicí nádoba se musí k měřicímu zařízení připojit tak, aby kladný potenciál byl na venkovní elektrodě. Doba elektrizace vzorku, pokud není dána pro konkrétní druh kapalného izolantu, probíhá 1 minutu po připojení napětí.

Po 1 minutě se odečte velikost odporu a ze vztahu (47) se vypočte hodnota vnitřní rezistivity.

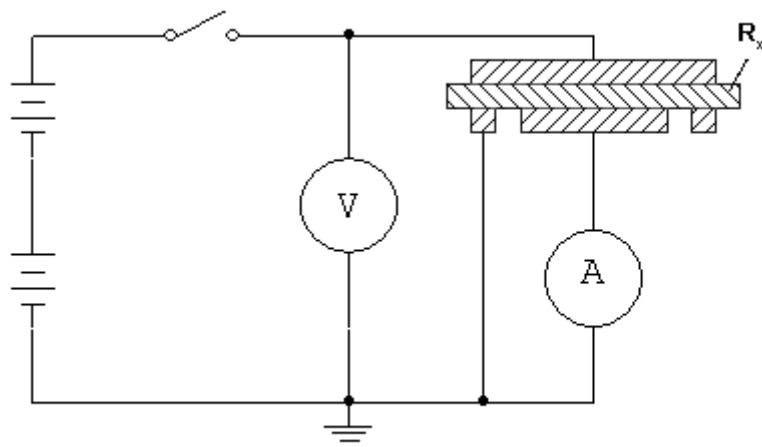
$$\rho_v = \frac{1}{\varepsilon_0} C_0 R_v, \quad (47)$$

kde je C_0 kapacita prázdné elektrické nádoby, R_v naměřená hodnota vnitřního elektrického odporu, ε_0 permitivita vakua.

Nejpoužívanější metody pro měření odporu jsou: voltampérová metoda, metoda Wheatstonova můstku a kompenzační metoda [3].

1.5.1 Voltampérová metoda

Jedná se o metodu přímou. Je to nejjednodušší metoda přímého čtení procházejícího proudu, jejíž princip vychází z schématu na obr. 10.



Obr. 10: Voltampérová metoda pro měření odporu

V zapojení s kvalitním elektrometrem je tato metoda nejpohotovější a nejlépe fungující pro měření odporu kvalitních izolantů. Jedná se řádově o proudy až 10^{-14} až 10^{-16} A, tedy o oblast, v níž jsou ostatní metody necitlivé. Neznámý odpor R_x se vypočítá

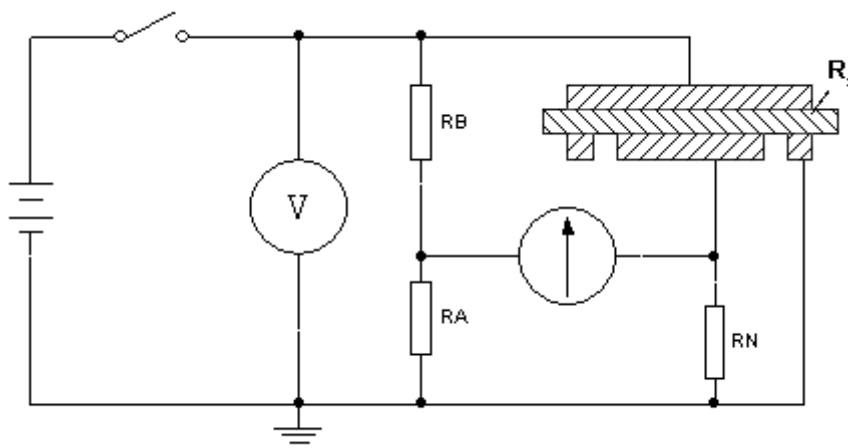
$$R_x = \frac{U}{I_x}, \quad (48)$$

kde je U připojené napětí, I_x proud protékající vzorkem [3].

1.5.2 Metoda Wheatstonova můstku

Tato metoda patří mezi metody porovnávací. Vychází z principu Wheatstonova můstku. Srovnává se neznámý odpor se známým referenčním odporem velké hodnoty.

Odpor R_B se mění v dekadových stupních, odpor R_A se používá na jemné vyrovnaní a odpor R_N se při měření nemění. Nulový indikátor je tvořen stejnosměrným zesilovačem.



Obr. 11: Metoda wheatstonova můstku

Pro neznámý odpor při vyváženém můstku platí

$$R_x = \frac{R_N R_B}{R_A}, \quad (49)$$

kde R_A , R_B , R_N jsou odpory můstku dle obr. 11.

Metodou Wheatstonova můstku lze měřit s požadovanou přesností při 100 V odpory do 10^{13} až 10^{14} . Tato metoda není vhodná pro měření, kde proud tekoucí vzorkem je časově závislý a pro měření kvalitních izolantů [2].

1.5.3 Kompenzační metoda

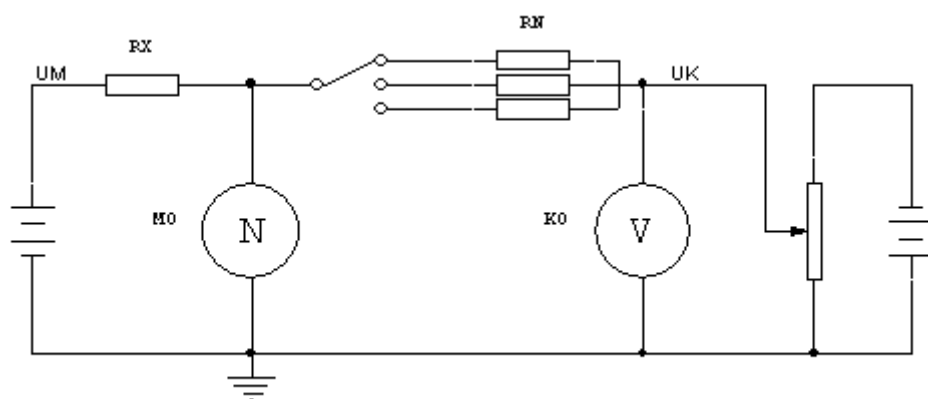
Pracuje podle schématu na obr. 12. Schéma je rozděleno na měrný obvod MO , kde je umístěn zdroj měrného napětí U_M a kompenzační obvod KO , ve kterém se nachází referenční odpor R_N a zdroj kompenzačního napětí U_K . Měrný obvod obsahuje měrný vzorek s neznámým odporem R_x , který je připojen na měrné napětí.

Princip metody spočívá v kompenzaci úbytku napětí na odporovém normálu R_N pomocným proměnným napětím U_K .

V okamžiku vykompenzování nebude indikátorem N protékat proud a bude splněna rovnost

$$\frac{U_M}{R_x} = \frac{U_K}{R_N} \Rightarrow R_x = \frac{R_N U_M}{U_K}, \quad (50)$$

kde je U_M měrné napětí, U_K kompenzační napětí měřené voltmetrem [2].



Obr. 12: Princip kompenzační metody

1.6 Stárnutí dielektrických materiálů

Stárnutí je definováno jako vzrůstající znehodnocení dielektrických materiálů, které trvale zhoršuje jejich účelové vlastnosti působením fyzikálních a chemických přeměn v závislosti na čase. K tomuto jevu dochází prostřednictvím vlivů a podmínek, kterým je dielektrikum vystaveno. Stárnutí se výrazněji uplatňuje u látek organických. U látek anorganických se až na některé výjimky neprojevuje. Doba života izolačního systému závisí hlavně na vlastnostech dielektrických materiálů, což úzce souvisí i se stárnutím. Doba života izolačního systému a potažmo i doba života elektrického zařízení, je doba, kdy je systém či zařízení schopno konat normální činnost, pro kterou bylo vyrobeno a využíváno. Po uplynutí doby života zestárne materiál do takové míry, že není schopný dále plnit požadované funkce. Stárnutím podmíněné změny vlastností izolantů se dělí na změny vratné a nevratné. Vratné změny jsou změny dočasné. Ty odezní hned, přestanou-li působit vnější vlivy, které změnu vyvolaly. Materiál pak po čase získá původní vlastnosti. Vratné změny jsou fyzikálního charakteru. Nevratné (trvalé) změny jsou důsledkem komplikovaných chemicko-fyzikálních dějů. Jsou strukturálního charakteru a vlastnosti materiálů se trvale zhorší. Změny nemusí nastat v celém materiálu, ale mohou být pouze povrchového rázu. Potom lze hovořit o korozi materiálu. Faktorů, které způsobují přeměnu dielektrických a izolačních materiálů je několik. Zpravidla jich však působí několik současně. Mezi faktory způsobující degradaci dielektrik patří: teplota, vzdušný kyslík, mechanická namáhání, elektrické pole, klimatické vlivy, chemické vlivy, ultrafialové záření aj.

1.6.1 Tepelné stárnutí

Nejčastějším případem stárnutí organických izolantů je stárnutí tepelné. Ostatní faktory pouze dopomáhají k destrukci, způsobené tepelným namáháním. Nevratné změny, které při tepelném stárnutí probíhají, jsou podmíněny sérií chemických reakcí (oxidace, polymerace a polykondenzace, depolymerace a rozklad některých komponent materiálu). Tyto procesy se dějí při všech teplotách, ale s rostoucí teplotou se tyto procesy urychlují. Pro rychlost stárnutí není rozhodující kvantum dodané tepelné energie, ale úroveň teploty. Tepelná odolnost izolačního systému většinou tvoří nejslabší článek z hlediska spolehlivosti celého zařízení.

Jeden z prvních pokusů o číselné vyjádření účinků tepelného stárnutí provedl Montsinger, který studoval dobu života τ papírové izolace vodičů v olejových transformátorech. Měřil úbytek mechanické pevnosti papíru v závislosti na konstantní teplotě a na základě svých výsledků stanovil rovnici

$$\tau = A \exp(-B \vartheta_T), \quad (51)$$

kde A, B jsou materiálové konstanty určeny experimentálně, ϑ_T je trvalá teplota stárnutí.

Dobu života lze určit také z Arrheniovy rovnice

$$\tau = A \exp\left(-\frac{W_a}{RT}\right), \quad (52)$$

kde je W_a aktivační energie procesu, R univerzální plynová konstanta, A konstanta závislá na koncentraci vzniklých aktivních molekul, T absolutní teplota.

Životnost materiálu je tedy exponenciální funkcí teploty stárnutí, tj. se zvýšením teploty se exponenciálně zkracuje délka životnosti.

Další práce Büssinga dává do souvislosti změny chemické stavby izolantů vyvolané působením teploty se zhoršováním jejich fyzikálních vlastností. Rychlost chemické reakce lze považovat za rychlost stárnutí. Rovnice (53) je obecně nazývána Büssingovým teorémem

$$\tau = C \exp \frac{B}{T}, \quad (53)$$

kde jsou B , C materiálové konstanty.

Oproti Montsingerově rovnici v ní lze konstanty B a C stanovit výpočtem. Büssingův teorém se stal základem pro hledání doby životnosti velkého množství organických izolantů.

Důležitými zdroji informací o izolačním materiálu jsou čáry života a čáry stárnutí izolace. Čára života je závislost doby života na teplotě, v níž materiál plní svou funkci, nebo na teplotě, při které je skladován. Čáry stárnutí jsou grafickým znázorněním průběhu hodnot sledovaného znaku v závislosti na čase, kde stálá teplota je parametrem [3].

1.6.2 Elektrické stárnutí

Elektrické stárnutí izolace je jedním z dominantních faktorů ovlivňujících stárnutí izolačního systému. Bohužel o přesném mechanismu působení elektrického pole na stárnutí materiálu je v současnosti známo jen velmi málo a většina poznatků jsou spíše empirického charakteru. První modely pro elektrické (napět'ové) stárnutí byly vyvíjeny v sedmdesátých letech dvacátého století. Základní model je založen na nepřímém mocninném vztahu

$$\tau_E = AE^{-B}. \quad (54)$$

V anglické literatuře bývá označován IPM (Inverse Power Model) a často se uvádí v exponenciálním tvaru při použití jiných koeficientů

$$\tau_E = \exp(-CE), \quad (55)$$

kde je τ_E doba života při elektrickém namáhání, A , B , C konstanty, které je třeba určit empiricky, E velikost působícího pole.

Zmíněné modely popisují stárnutí v jakémkoli materiálu, který je vystaven působení elektrického pole. Pro tyto modely není třeba znát dokonale všechny procesy, které elektrické pole v materiálu indukuje, ani další okolnosti, jako např. přítomnost částečných výbojů. Model dokonce není závislý ani na struktuře systému ani na konfiguraci elektrod a rozložení elektrického pole. Vztahy (54) a (55) jsou pouze empiricky odvozené modely, které popisují vliv intenzity elektrického pole na stárnutí izolačního systému. Přesto tyto modely poskytují poměrně dobré výsledky a vypočtené doby života korespondují s realitou. Zmíněné modely (zejména exponenciální model) ovšem selhávají při nižších hladinách intenzity elektrického pole. To je vysvětlováno teorií, podle které existuje určitá prahová intenzita, pod kterou již elektrické pole stárnutí materiálu nepůsobuje [20].

2 Praktická část

2.1 Zkušební vzorky

Předmětem experimentálního zkoumání jsou vzorky olejů ESTO BNX, RENOLIN ELTEC a MIDEL 7131.

ESTO BNX je naftenický minerální olej s optimalizovaným obsahem aromatických uhlovodíků, který se vyznačuje velkou stabilitou proti oxidaci. Transformátorový olej má velmi dobré izolační a chladicí vlastnosti. Lze jej vhodně využít v izolačních systémech vysokonapěťových zařízení. V tabulce se nachází údaje o základních fyzikálních, chemických a dielektrických vlastnostech získané od dodavatele oleje.

Tab. 1 : Vlastnosti minerálního oleje ESTO BNX [24]

Elektrická pevnost	min. $2 \cdot 10^7 \text{ V m}^{-1}$
Relativní permitivita	2,14
Ztrátový činitel	max. $5 \cdot 10^{-3}$
Vnitřní rezistivita	min. $6 \cdot 10^{10} \Omega \text{ m}$
Hustota	max. 895 kg m^{-3}
Dynamická viskozita při 40 °C	max. $1,65 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$
Povrchové napětí	min. $4 \cdot 10^{-2} \text{ N m}^{-1}$
Obsah vody	max. 30 mg kg^{-1}
Obsah inhibitorů	max. 0,3-0,5 % hmotnosti
Neutralizační číslo	max. $0,03 \text{ mg KOH g}^{-1}$

RENOLIN ELTEC je vysoce hodnotný, neinhibovaný izolační olej na bázi speciálních naftenických základových olejů, který se používá pro transformátory, měniče a spínače i při nízkých venkovních teplotách. Předností tohoto oleje je vysoká pevnost proti průrazu, vynikající stabilita vůči stárnutí, velmi dobrá tepelná vodivost a nízký bod tuhnutí. Vlastnosti oleje jsou znázorněny v tab. 2.

Tab. 2 : Vlastnosti minerálního oleje RENOLIN ELTEC [22]

Čistota	čirý, bez pevných látek
Barva	0,5 ASTM
Hustota při 20 °C	870 kg m^{-3}
Kinematická viskozita při 40°C	$9,5 \text{ mm}^2 \text{ s}^{-1}$
Kinematická viskozita při -30°C	$920 \text{ mm}^2 \text{ s}^{-1}$
Bod vzplanutí	148 °C
Bod tuhnutí	-60 °C
Neutralizační číslo	max. $0,01 \text{ mg KOH g}^{-1}$
Obsah vody	max. 20 mg g^{-1}
Povrchové napětí	48 mN m^{-1}
Průrazné napětí	Min. 70 kV

MIDEL 7131 je vyzkoušená a osvědčená syntetická izolační kapalina na bázi organických esterů. Používá se jako náhrada za minerální oleje v transformátorech tam, kde je nutná zvýšená ochrana lidí a majetku před nebezpečím ohně nebo v místech, kde jsou zvýšené požadavky na ochranu životního prostředí. Olej byl vyroben s izolačními a chladicími schopnostmi srovnatelnými s vlastnostmi běžně používaných minerálních olejů a jeho vlastnosti odpovídají požadavkům výrobců transformátorů. Je velmi dobře odolný proti oxidaci a je schopen absorbovat mnohem víc vlhkosti než minerální oleje, bez zhoršení jeho funkce jako izolantu. V hermeticky uzavřených transformátorech pracujících při běžných teplotách je olej schopen absorbovat vlhkost produkovanou rozpadem celulózy z vinutí a v době životnosti transformátoru je nepravděpodobné, že by potřeboval údržbu. MIDEL 7131 byl testován a schválen pojišťovnami a protipožárními autoritami pro použití v transformátorech umístěných uvnitř budov a v jiných kritických oblastech bez zvláštních protipožárních opatření. Jeho vysoký bod hoření, nízká těkavost a vynikající tepelné vlastnosti znamenají, že při vnitřní poruše transformátoru nedojde k rozšíření vzniklého ohně do okolí. Pokud se k transformátoru dostane oheň z okolí, MIDEL neprodukuje hustý kouř ani toxické plyny, které by mohly znemožnit únik osob ze zasažené oblasti. Tento organický ester je velmi vlídnou kapalinou z pohledu znečištění vody. Při případném vylití do vody jsou živé organismy uchráněny toxických efektů, neboť MIDEL je samostatně biologicky odbouratelný. Rozsáhlé testy na toxicitu dokázaly, že MIDEL není karcinogenní ani jinak zdraví škodlivý.

Tab. 3 : Vlastnosti minerálního oleje MIDEL 7131 [23]

Čistota	Jasný bez usazenin
Barva	125 HU
Hustota při 20 °C	970 kg m ⁻³
Kinematická viskozita při 40°C	28 mm ² s ⁻¹
Kinematická viskozita při -20°C	1500 mm ² s ⁻¹
Bod vzplanutí	275 °C
Bod hoření	322 °C
Bod tuhnutí	-60 °C
Neutralizační číslo	max. 0,03 mg KOH g ⁻¹
Obsah vody	50 mg g ⁻¹
Povrchové napětí	48 mN m ⁻¹
Průrazné napětí	Min. 70 kV
Měrný odpor při 90 °C	min. 5.10 ¹⁰ Ω m

2.2 Stárnutí vzorků

2.2.1 Tepelné stárnutí

Tepelné stárnutí probíhalo v přístroji Stericell, který slouží k horkovzdušné sterilizaci materiálů při stanovených parametrech teploty a času. Přístroj využívá systém nuceného proudění vzduchu v komoře pomocí vestavěného ventilátoru, který eliminuje vznik oblasti studeného vzduchu. Teplotní rozsah přístroje je od 10 °C nad okolní teplotu do 250 °C s maximální odchylkou teploty -1/+5 °C. Průběh teploty je řízen mikroprocesorovou automatikou s digitálním displejem a teplotním čidlem PT 100 [21].

Tepelné stárnutí bylo provedeno pro vzorek oleje MIDEL 7131 za teploty 120 °C po dobu 100 h.

2.2.2 Elektrické stárnutí

Zkouška elektrické pevnosti byla prováděna pro olej MIDEL 7131 od výrobce BAUR. Na přístroji byl nastaven náběh napětí 2 kV s^{-1} , vzdálenost elektrod mezi kterými docházelo k elektrickému průrazu je 3 mm. Celkem bylo provedeno 50 výbojů, u kterých bylo odečteno průrazné napětí U_p . Z těchto padesáti hodnot průrazného napětí byla vyškrtnuta maximální a minimální hodnota. Z ostatních hodnot byla spočítána pomocí mediánu nejpravděpodobnější hodnota průrazného napětí U_p , která byla 65,5 kV.

Tab. 4 : Průrazná napětí

Pořadí výboje	U_p (kV)	Pořadí výboje	U_p (kV)
1	70	26	63
2	59	27	71
3	35	28	68
4	64	29	54
5	72	30	59
6	78	31	60
7	72	32	59
8	51	33	72
9	71	34	63
10	74	35	69
11	54	36	65
12	64	37	62
13	66	38	73
14	60	39	64
15	37	40	68
16	72	41	60
17	62	42	69
18	73	43	75
19	70	44	49
20	59	45	56
21	77	46	63
22	63	47	72
23	72	48	77
24	66	49	80
25	62	50	72

Elektrická pevnost byla spočítána dle vzorce

$$E_p = \frac{U_p}{d}, \quad (56)$$

kde je d vzdálenost elektrod, mezi kterými docházelo k elektrickým průrazům. Hodnota elektrické pevnosti oleje MIDEL 7131 je $E_p = 218,33 \text{ kV cm}^{-1}$.

2.3 Výsledky a vyhodnocení hustoty

Měření hustoty probíhalo v teplotním rozsahu 20 – 90 °C pomocí dvou laboratorních hustoměrů (s rozsahem 800-900 kg m⁻³ a 900-1000 kg m⁻³), magnetické míchačky s ohřevem značky Heidolph typ MR Hei-Standart a digitálního teploměru Greisinger electronic typ GMH3210. Naměřené hodnoty hustoty se nachází v tab. 5, graficky pak znázorněny na obr 13.

Tab. 5 : Naměřené hodnoty hustoty

ESTO BNX		RENOLIN ELTEC		MIDEL 7131	
ϑ (°C)	ρ (kg m ⁻³)	ϑ (°C)	ρ (kg m ⁻³)	ϑ (°C)	ρ (kg m ⁻³)
22,3	889	21,0	868	21,0	967
30,1	874	30,8	862	30,3	960
40,0	868	40,1	856	40,1	953
50,7	860	50,1	849	50,2	946
60,0	855	65,1	837	65,0	934
69,0	850	80,0	827	80,1	922
70,0	848	93,0	813	92,9	915

Pokud dojde u kapalin ke změně teploty, pozorujeme u nich objemovou roztažnost. Pro většinu kapalin platí, že jejich objem se s rostoucí teplotou zvětšuje. Dále platí, že různé kapaliny se za jinak stejných podmínek roztahují různě.

Z naměřených hodnot hustoty lze vypočítat pomocí vztahu (57) součinitel teplotní roztažnosti pro jednotlivé vzorky oleje.

$$V = V_0(1 + \beta \Delta \vartheta), \quad (57)$$

kde je V objem kapaliny, V_0 objem kapaliny při počáteční teplotě, β součinitel teplotní roztažnosti, $\Delta \vartheta$ změna teploty.

Pro objem platí

$$V = \frac{m}{\rho}, \quad (58)$$

kde je m hmotnost.

Po dosazení rovnice (58) do vztahu (57) a následné úpravě dostaneme

$$\rho = \frac{\rho_0}{(1 + \beta \Delta \vartheta)}, \quad (59)$$

kde je ρ_0 počáteční hustota kapaliny.

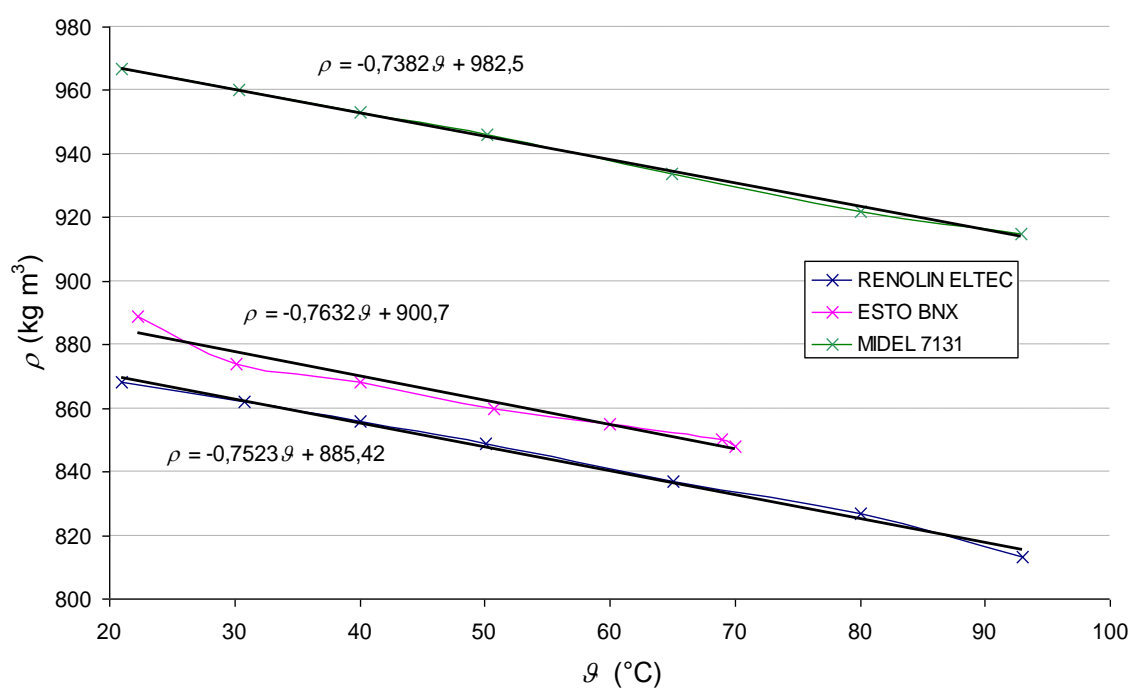
Vztah (59) lze napsat ve tvaru (60), pomocí kterého lze jednoduše získat součinitel teplotní roztažnosti z grafického řešení.

$$\rho = \rho_0 - \frac{\rho_0 \beta \Delta \vartheta}{1 + \beta \Delta \vartheta}. \quad (60)$$

Pro výpočet β byla použita i numerická metoda. Ta na rozdíl od grafické metody je méně přesná, protože vzhledem k chybám měření neexistuje pouze jediná konstanta β . Z tohoto důvodu byly použity hodnoty součinitele teplotní roztažnosti z grafického řešení a následně vypočítány hodnoty hustoty pro jednotlivé teploty (tab. 6).

Tab. 6 : Vypočítané hodnoty hustoty

	ESTO BNX	RENOLIN ELTEC	MIDEL 7131
ϑ (°C)	ρ (kg m ⁻³)	ρ (kg m ⁻³)	ρ (kg m ⁻³)
20	870	885	968
30	863	877	960
40	855	870	953
50	848	862	946
60	840	855	938
70	833	847	931
80	825	839	925
90	818	832	916
β (K ⁻¹)	0,000855	0,000864	0,000763



Obr. 13: Závislost hustoty na teplotě

2.4 Výsledky a vyhodnocení dynamické viskozity

Dynamická viskozita byla měřena dvěma metodami. Byly použity následující přístroje: Höpplerův viskozimetr s termostatem, vibrační viskozimetr SV – 10 s kryostatem medingen.

Princip Höpplerova viskozimetru je znázorněn na obr. 2, termostat je určen k regulaci a nastavení stálé teploty V laboratoři se používá průmyslově vyráběný kapalinový termostat. Temperující lázeň je promíchávána čerpadlem a zahřívána topným tělesem. Elektrický proud tekoucí topným tělesem je zapínán a vypínán regulačním obvodem. Stálost teploty temperující lázně je u termostatu $\pm 0,02$ °C. Měření dynamické viskozity pomocí Höpplerova viskozimetru spočívalo v nastavení požadované teploty na termostatu, následně její odečtení na vsunutém teploměru a měření doby pádu kuličky mezi dvěma ryskami skleněnou trubicí. Při každé teplotě bylo změřeno pět dob pádu kuličky a pro výpočet dynamické viskozity dle vzorce (12) byla použita jejich průměrná hodnota. Jelikož je viskozita oleje MIDEL 7131 větší, bylo potřeba použít jiné kuličky než u minerálních olejů. Jejich parametry se nacházejí v tab. 7. Naměřené hodnoty a výpočet dynamické viskozity pro různé vzorky oleje jsou v tab. 8, tab. 9 a tab. 10.

Tab. 7 : Parametry skleněné a kovové kuličky

	ρ (g cm ⁻³)	m (g)	d (mm)	V (mm ³)	K (mPa cm ³ g ⁻¹)
skleněná kulička	2,23	4,455	15,6348	2001,1	0,070
kovová kulička	8,14	16,045	15,6348	2001,1	0,134

Tab. 8 : Změřené a vypočítané hodnoty dynamické viskozity oleje ESTO BNX

ϑ (°C)	22,5	30,3	40,2	50,2	65,5	80,0	89,8
ρ (kg cm ⁻³)	883	877	870	862	850	839	832
t_1 (s)	203	144	98	70	46	33	27
t_2 (s)	205	144	99	70	46	33	26
t_3 (s)	204	145	98	70	46	32	27
t_4 (s)	203	145	98	70	46	33	27
t_5 (s)	202	144	98	71	46	33	27
\bar{t} (s)	203	144	98	70	46	33	27
η (Pa s)	1,92E-02	1,37E-02	9,34E-03	6,71E-03	4,43E-03	3,18E-03	2,60E-03

Tab. 9 : Změřené a vypočítané hodnoty dynamické viskozity oleje RENOLIN ELTEC

ϑ (°C)	23,0	32,0	41,0	50,0	65,5	79,7	96,3
ρ (kg cm ⁻³)	868	861	855	848	836	825	813
t_1 (s)	166	110	85	63	41	30	23
t_2 (s)	160	114	84	63	41	30	23
t_3 (s)	163	113	85	62	41	30	24
t_4 (s)	162	115	86	63	41	30	24
t_5 (s)	162	114	87	63	41	30	23
\bar{t} (s)	163	113	85	63	41	30	23
η (Pa s)	1,64E-02	1,14E-02	8,67E-03	6,41E-03	4,22E-03	3,11E-03	2,45E-03

Tab. 10 : Změřené a vypočítané hodnoty dynamické viskozity oleje MIDEL 7131

$\vartheta (^{\circ}\text{C})$	23,4	31,3	39,1	50,3	65,1	79,7	95,1
$\rho (\text{kg cm}^{-3})$	965	959	954	945	934	924	912
$t_1 (\text{s})$	57	43	32	208	128	88	58
$t_2 (\text{s})$	58	43	31	204	125	83	58
$t_3 (\text{s})$	58	43	31	204	126	83	58
$t_4 (\text{s})$	59	44	31	208	125	83	57
$t_5 (\text{s})$	58	44	31	205	125	82	57
$\bar{t} (\text{s})$	58	43	31	206	126	84	58
$\eta (\text{Pa s})$	5,58E-02	4,18E-02	3,01E-02	1,85E-02	1,14E-02	7,66E-03	5,31E-03

Pro měření dynamické viskozity v širším teplotním rozsahu bylo mým úkolem sestavit a automatizovat pracoviště s vibračním viskozimetrem SV – 10 a kryostatem medingen pomocí programu VEE pro. Program (obr. 14) byl sestaven tak aby uživatel mohl nastavit požadované teploty měření (nastavení kryostatu), dobu, po kterou má být vzorek prohříván, a počet, frekvenci zapisovaných dat do Excelu z přístroje SV – 10.

Data získaná z přístroje SV – 10 je nutno přepočítat dle vzorce

$$\eta = \frac{\eta_D}{\rho}, \quad (61)$$

kde je η_D hodnota viskozity odečtená z přístroje.

Naměřené hodnoty viskozity pomocí viskozimetru SV – 10 se nachází v tab. 11.

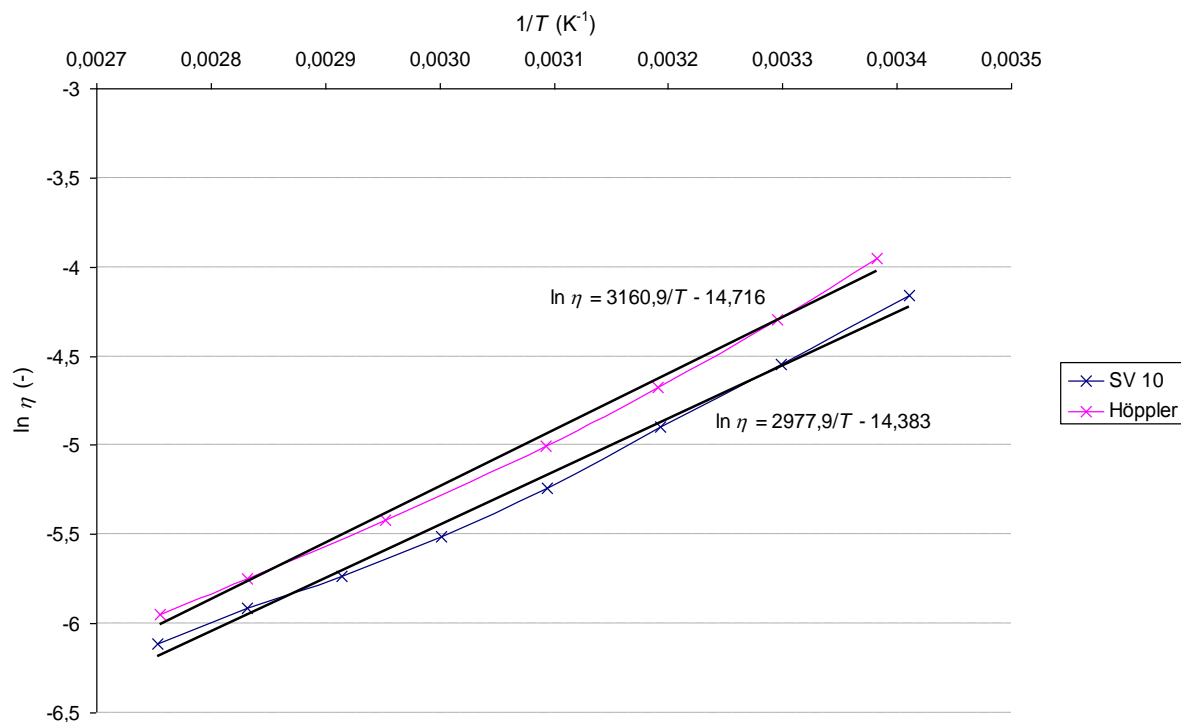
Tab. 11 : Změřené a vypočítané hodnoty dynamické viskozity

	ESTO BNX		RENOLIN ELTEC		MIDEL 7131	
$\vartheta (^{\circ}\text{C})$	$\eta_D (\text{Pa s})$	$\eta (\text{Pa s})$	$\eta_D (\text{Pa s})$	$\eta (\text{Pa s})$	$\eta_D (\text{Pa s})$	$\eta (\text{Pa s})$
20	1,39E-02	1,57E-02	1,21E-02	1,39E-02	4,89E-02	5,05E-02
30	9,31E-03	1,06E-02	7,80E-03	9,04E-03	2,95E-02	3,07E-02
40	6,52E-03	7,49E-03	5,51E-03	6,44E-03	1,91E-02	2,00E-02
50	4,56E-03	5,29E-03	4,10E-03	4,83E-03	1,30E-02	1,38E-02
60	3,45E-03	4,04E-03	3,06E-03	3,64E-03	9,09E-03	9,69E-03
70	2,74E-03	3,24E-03	2,42E-03	2,91E-03	6,93E-03	7,44E-03
80	2,27E-03	2,71E-03	1,90E-03	2,30E-03	5,37E-03	5,81E-03
90	1,84E-03	2,21E-03	1,54E-03	1,88E-03	4,29E-03	4,68E-03
	MIDEL 7131 po elektrickém namáhání		MIDEL 7131 po tepelném namáhání			
$\vartheta (^{\circ}\text{C})$	$\eta_D (\text{Pa s})$	$\eta (\text{Pa s})$	$\eta_D (\text{Pa s})$	$\eta (\text{Pa s})$		
20	4,74E-02	4,89E-02	4,86E-02	5,02E-02		
30	3,05E-02	3,18E-02	3,12E-02	3,25E-02		
40	2,05E-02	2,15E-02	1,95E-02	2,04E-02		
50	1,34E-02	1,41E-02	1,34E-02	1,41E-02		
60	9,58E-03	1,02E-02	9,49E-03	1,01E-02		
70	7,07E-03	7,59E-03	7,12E-03	7,65E-03		
80	5,38E-03	5,82E-03	5,51E-03	5,96E-03		
90	4,35E-03	4,75E-03	4,54E-03	4,96E-03		

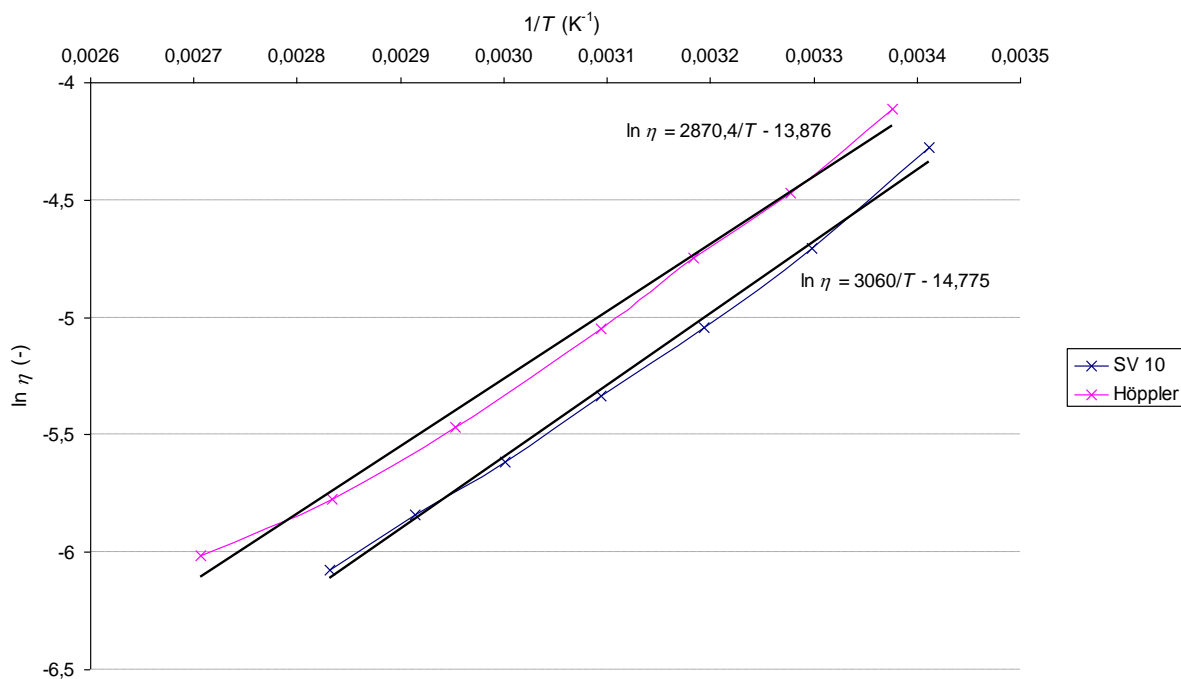
Abychom mohli napsat funkci závislosti dynamické viskozity na teplotě ve tvaru (3) je potřeba získat hodnoty konstant A a B . Proto rovnici ve tvaru (3) zjednodušíme

$$\ln \eta = A + \frac{B}{T} \quad (62)$$

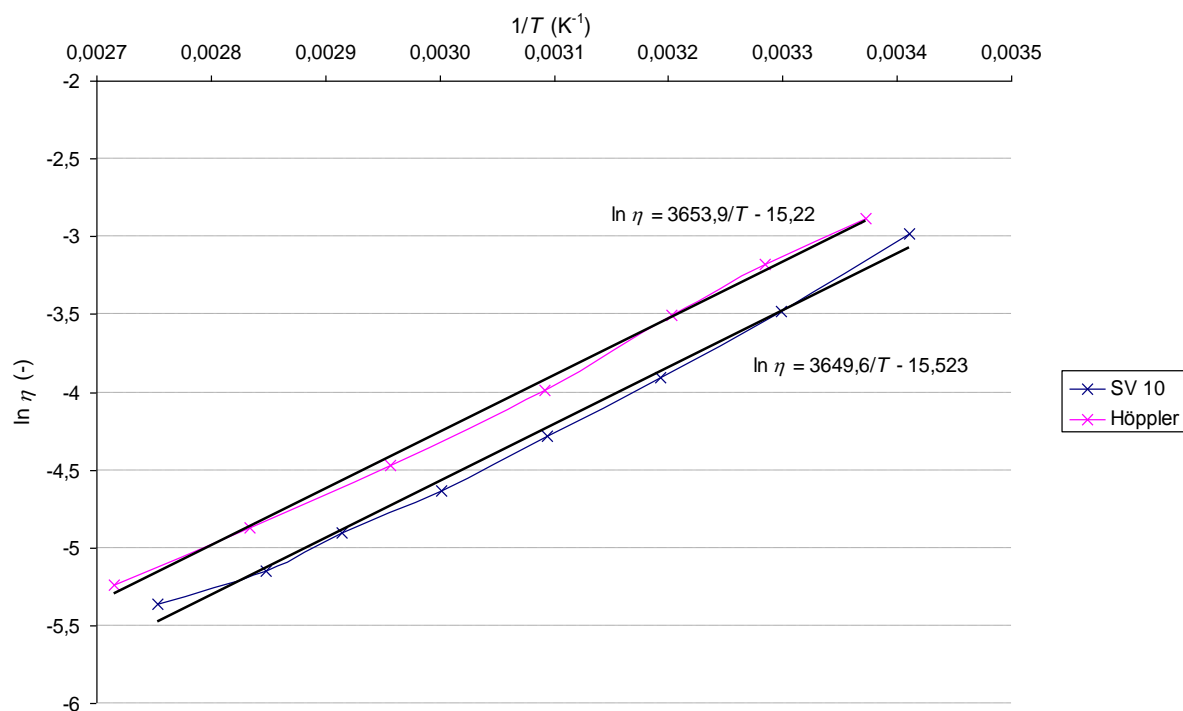
a hodnoty A a B odečteme z grafického řešení.



Obr. 15: Závislost logaritmu dynamické viskozity na převrácené hodnotě teploty oleje ESTO BNX

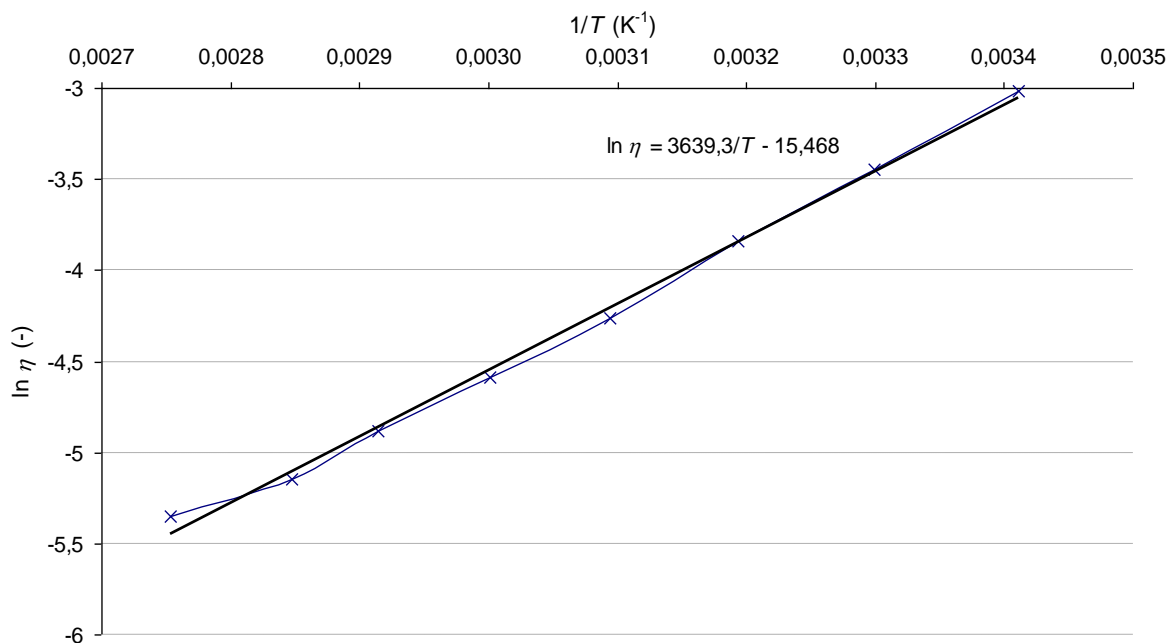


Obr. 16: Závislost logaritmu dynamické viskozity na převrácené hodnotě teploty oleje RENOLIN ELTEC

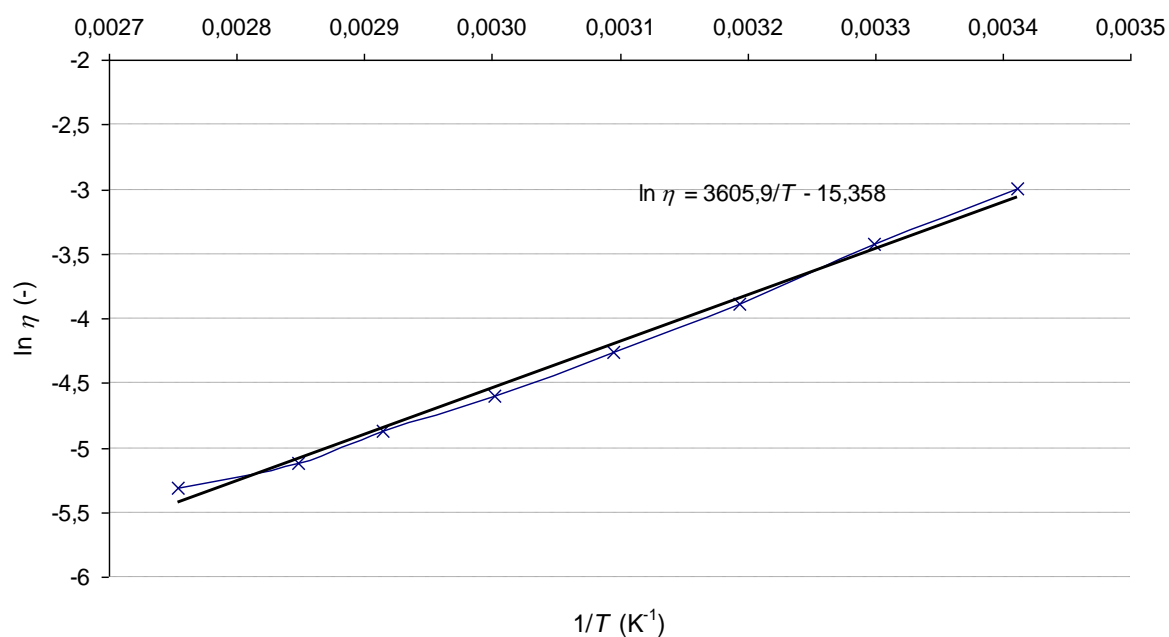


Obr. 17: Závislost logaritmu dynamické viskozity na převrácené hodnotě teploty oleje MIDEL 7131

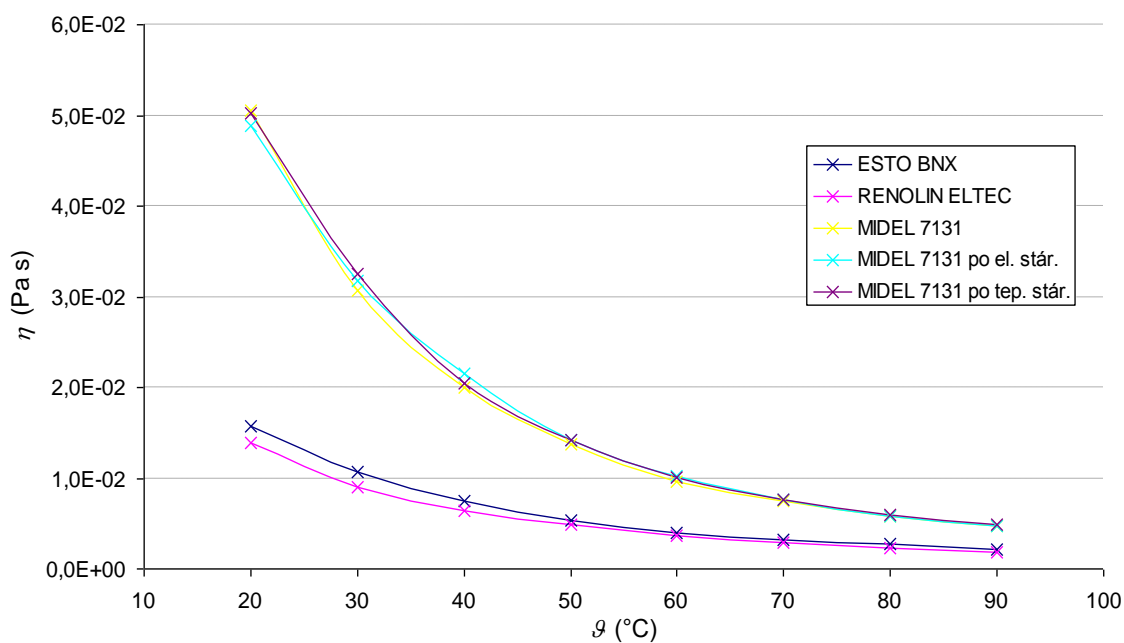
Z grafů lze pozorovat poměrně velký rozdíl naměřených hodnot dynamické viskozity Höpplerovým viskozimetrem a viskozimetrem SV – 10. Hodnoty naměřené viskozimetrem SV – 10 se považují za přesnější, z důvodu možnosti špatného prohřátí vzorku Höpplerova viskozimetru.



Obr. 18: Závislost logaritmu dynamické viskozity na převrácené hodnotě teploty oleje MIDEL 7131 po elektrickém namáhání



Obr. 19: Závislost logaritmu dynamické viskozity na převrácené hodnotě teploty oleje MIDEL 7131 po tepelném stárnutí namáhání



Obr. 20: Závislost dynamické viskozity na teplotě

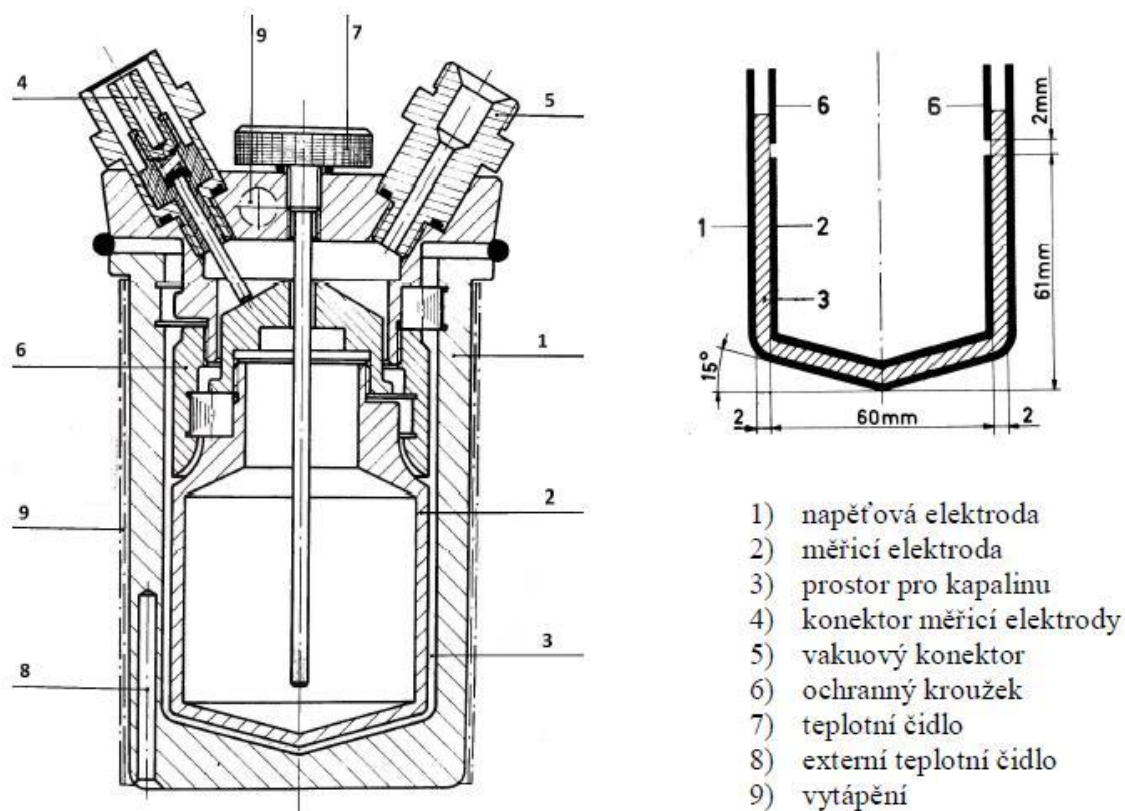
Z obr. 20 lze vidět velký rozdíl v hodnotách viskozity minerálních olejů a ekologického oleje. Změna charakteristiky po tepelném namáhání oleje je zanedbatelná, po elektrickém namáhání došlo při teplotách 20 $^{\circ}C$ a 30 $^{\circ}C$ k poklesu dynamické viskozity o cca 1 mPa s.

2.5 Výsledky a vyhodnocení elektrické vodivosti

Pracoviště pro měření elektrické vodivosti se skládalo s elektrometru Keithley 617, vysokonapěťového zdroje SRS PS 350 s nastavitelným napětím $0 - \pm 5 \text{ kV}$ a maximálním proudem 5 mA , měřicího systému s regulátorem teploty, teploměrem a válcovým kondenzátorem Tettex 2903, jehož parametry se nachází v tab. 12.

Tab. 12 : Technické parametry přístroje Tettex 2903 [10]

Rozteč elektrod	2 mm
Kapacita prázdné nádoby	cca 60 pF
Maximální napětí	2000 V
Maximální elektrické pole	10 kV/cm
Požadované množství kapaliny	40 cm ³
Rozměry	240x220 mm
Celková hmotnost	cca 10 kg



Obr. 21: Schéma měřicího systému Tettex 2903 (převzato z [10]).

Pracoviště bylo automatizováno pomocí programu VEE pro, pouze teplota se musela nastavovat ručně na termostatu. V průběhu experimentu byl sledován a zaznamenáván nabíjecí proud (900 hodnot pro každou teplotu) v závislosti na čase při napětí 500 V pro různé teploty. Pomocí Ohmova zákona byla vypočítána hodnota vnitřního elektrického odporu, následně dle vzorce (47) hodnota minutové rezistivity a následně dle vztahu (23) elektrická vodivost. Vypočítané hodnoty minutové rezistivity pro jednotlivé vzorky olejů se nachází v tab. 13.

Tab. 13 : Hodnoty minutové elektrické vodivosti pro 500 V při různých teplotách

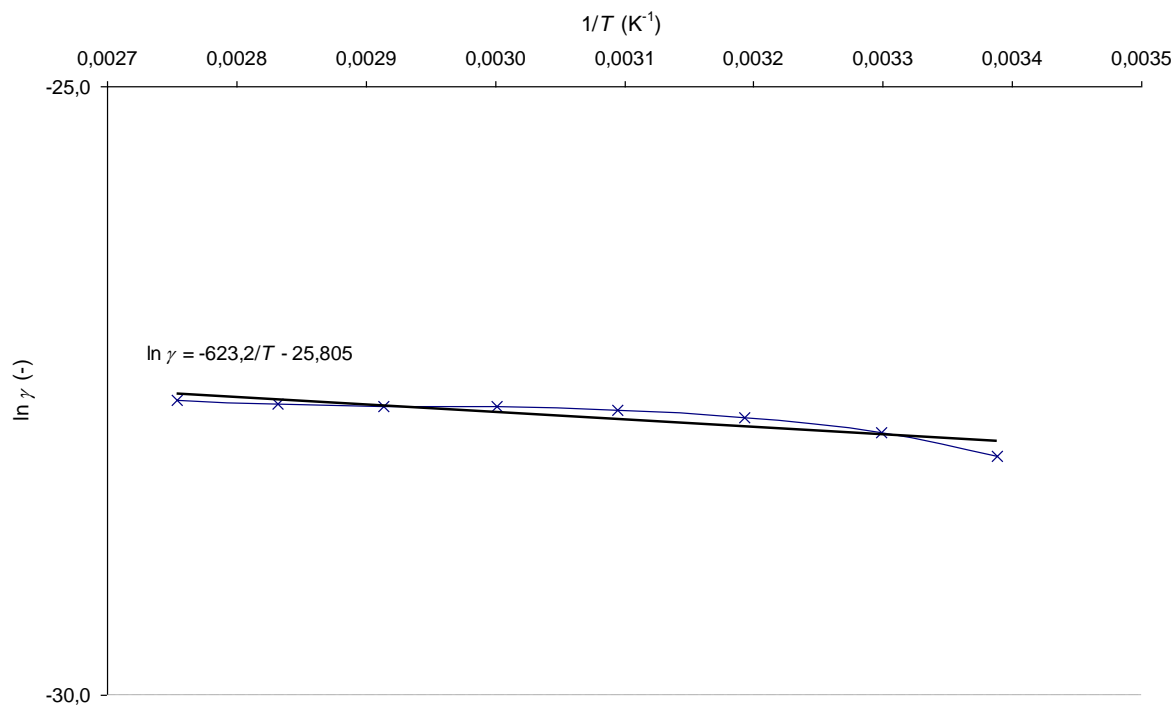
RENOLIN ELTEC		ESTO BNX		MIDEL 7131	MIDEL 7131 po tepelném namáhání	MIDEL 7131 po elektrickém namáhání
$\vartheta(^{\circ}\text{C})$	$\gamma(\text{S m}^{-1})$	$\vartheta(^{\circ}\text{C})$	$\gamma(\text{S m}^{-1})$	$\gamma(\text{S m}^{-1})$	$\gamma(\text{S m}^{-1})$	$\gamma(\text{S m}^{-1})$
21	5,51E-13	22	6,66E-13	5,49E-13	5,63E-13	6,50E-13
30	6,64E-13	30	8,13E-13	6,78E-13	6,90E-13	8,72E-13
40	8,31E-13	40	9,12E-13	7,96E-13	8,45E-13	9,87E-13
50	9,24E-13	50	9,69E-13	8,86E-13	8,97E-13	1,06E-12
60	9,71E-13	60	1,00E-12	9,19E-13	9,48E-13	1,11E-12
70	9,78E-13	70	1,01E-12	9,38E-13	9,93E-13	1,12E-12
80	1,01E-12	80	1,02E-12	9,82E-13	9,90E-13	1,13E-12
90	1,04E-12	90	1,06E-12	9,93E-13	1,01E-12	1,14E-12

Pomocí naměřených hodnot lze dle úpravy vzorce (30) na (63) určit funkci závislosti elektrické vodivosti na teplotě jednotlivých vzorků oleje. Hodnoty konstant A' a B získáme z grafického řešení. Na získané výsledky lze aplikovat Waldenův zákon (tab. 14).

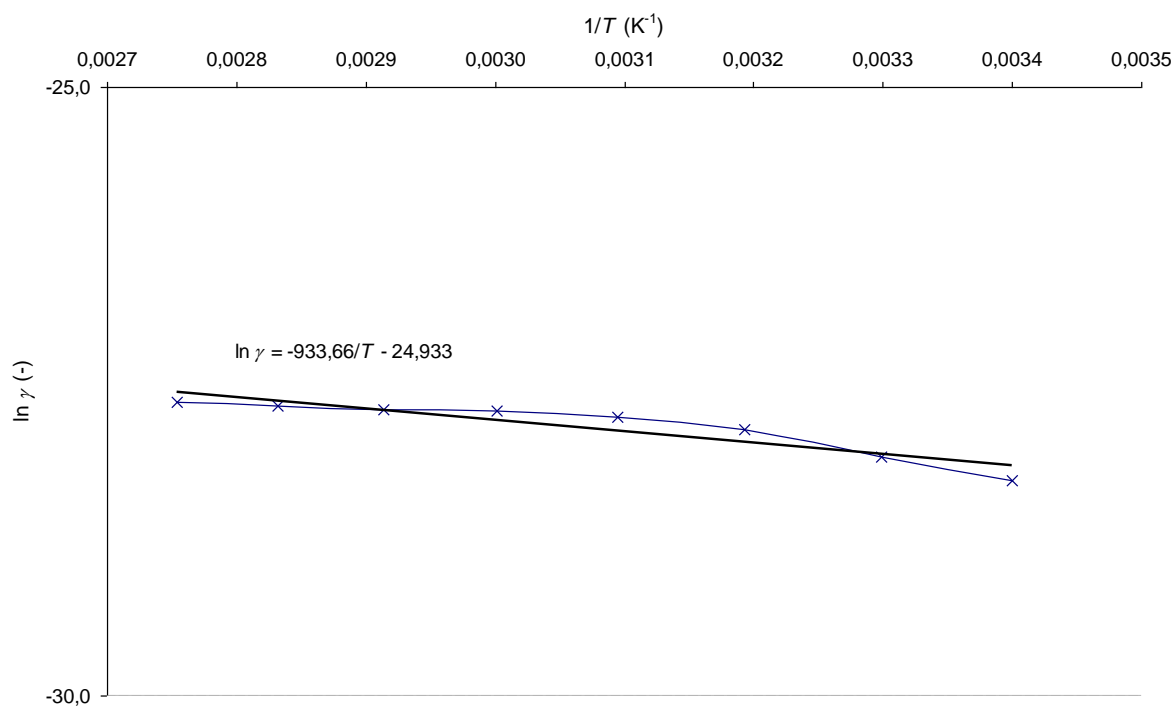
$$\ln \gamma = \ln A' - \frac{B}{T}. \quad (63)$$

Tab. 14 : Vypočítané hodnoty násobku elektrické vodivosti a dynamické viskozity

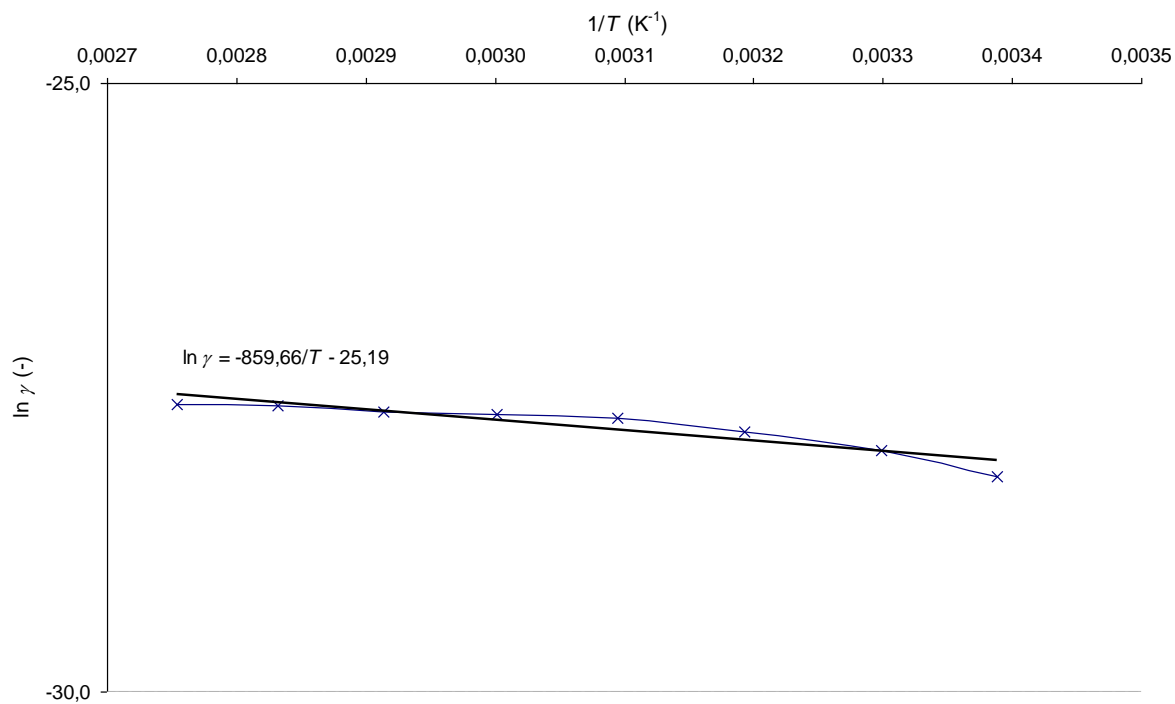
ESTO BNX		MIDEL 7131	MIDEL 7131 po tepelném namáhání	MIDEL 7131 po elektrickém namáhání
$\vartheta(^{\circ}\text{C})$	$(\text{S m}^{-1} \text{ Pa s})^{\gamma\eta}$	$(\text{S m}^{-1} \text{ Pa s})^{\gamma\eta}$	$(\text{S m}^{-1} \text{ Pa s})^{\gamma\eta}$	$(\text{S m}^{-1} \text{ Pa s})^{\gamma\eta}$
22	9,13E-15	2,33E-14	2,43E-14	2,71E-14
30	8,63E-15	2,08E-14	2,24E-14	2,77E-14
40	6,83E-15	1,60E-14	1,72E-14	2,13E-14
50	5,13E-15	1,22E-14	1,27E-14	1,50E-14
60	4,04E-15	8,90E-15	9,59E-15	1,14E-14
70	3,27E-15	6,98E-15	7,59E-15	8,50E-15
80	2,77E-15	5,70E-15	5,90E-15	6,55E-15
90	2,34E-15	4,65E-15	5,01E-15	5,41E-15
RENOLIN ELTEC				
$\vartheta(^{\circ}\text{C})$	$(\text{S m}^{-1} \text{ Pa s})^{\gamma\eta}$			
21	6,96E-15			
30	6,03E-15			
40	5,35E-15			
50	4,47E-15			
60	3,54E-15			
70	2,84E-15			
80	2,33E-15			
90	1,96E-12			



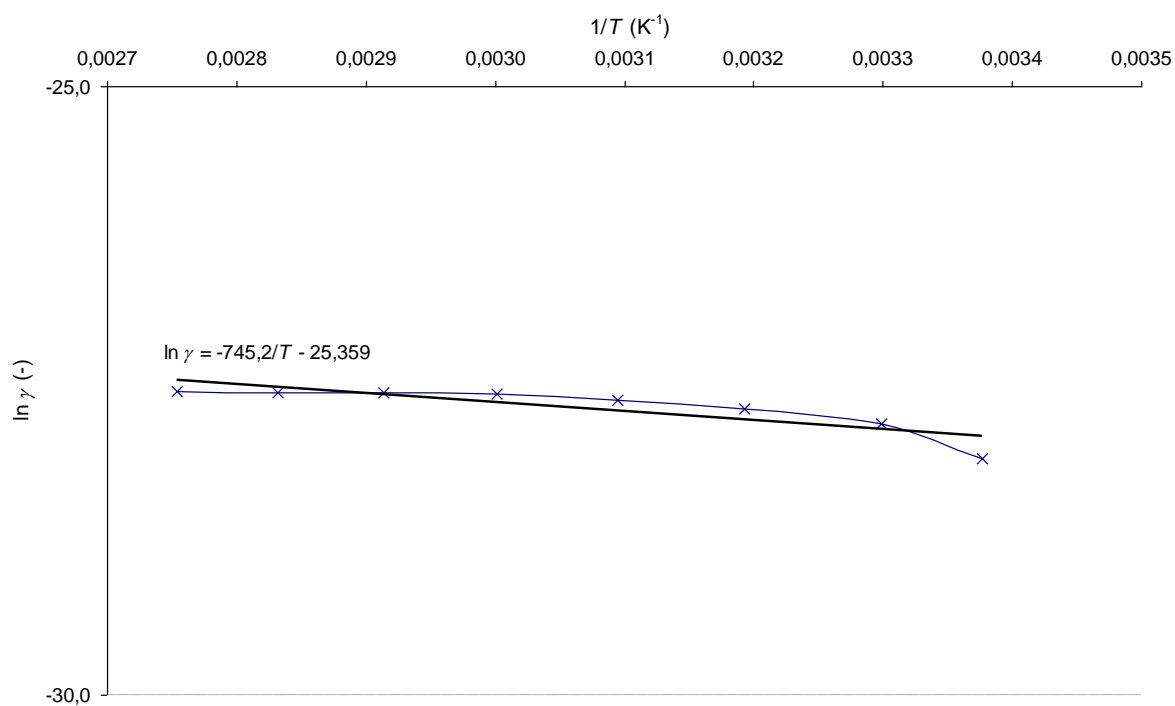
Obr. 22: Závislost logaritmu elektrické vodivosti na převrácené hodnotě teploty oleje ESTO BNX



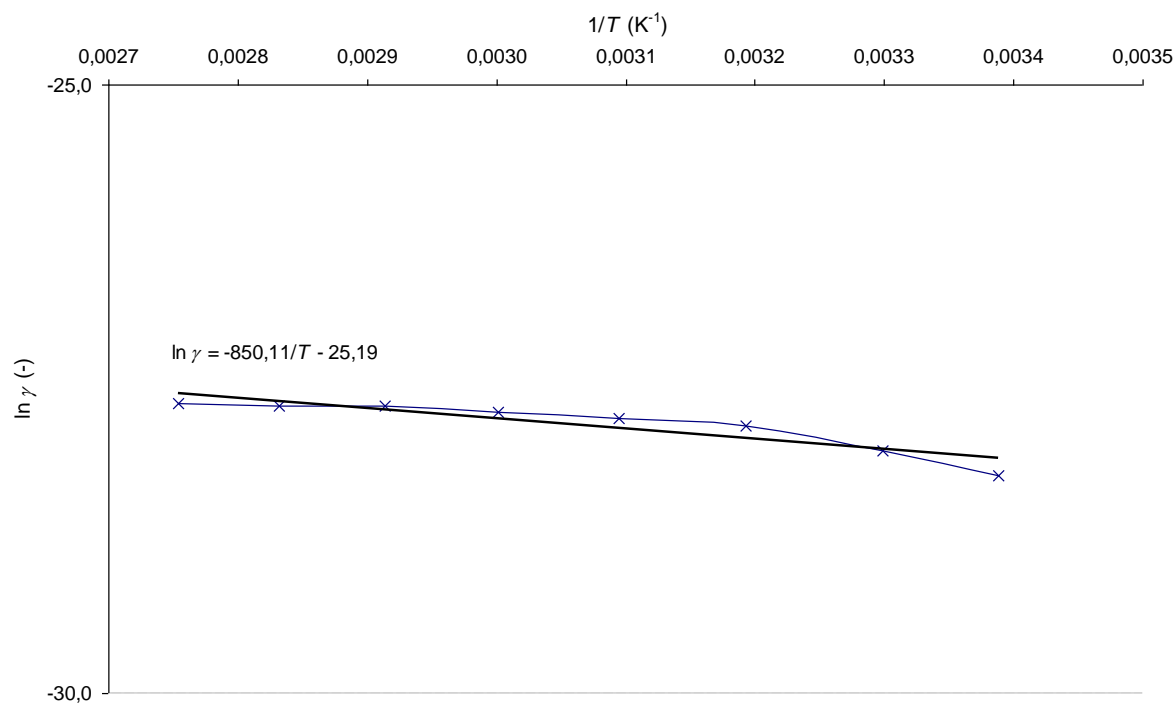
Obr. 23: Závislost logaritmu elektrické vodivosti na převrácené hodnotě teploty oleje RENOLIN ELTEC



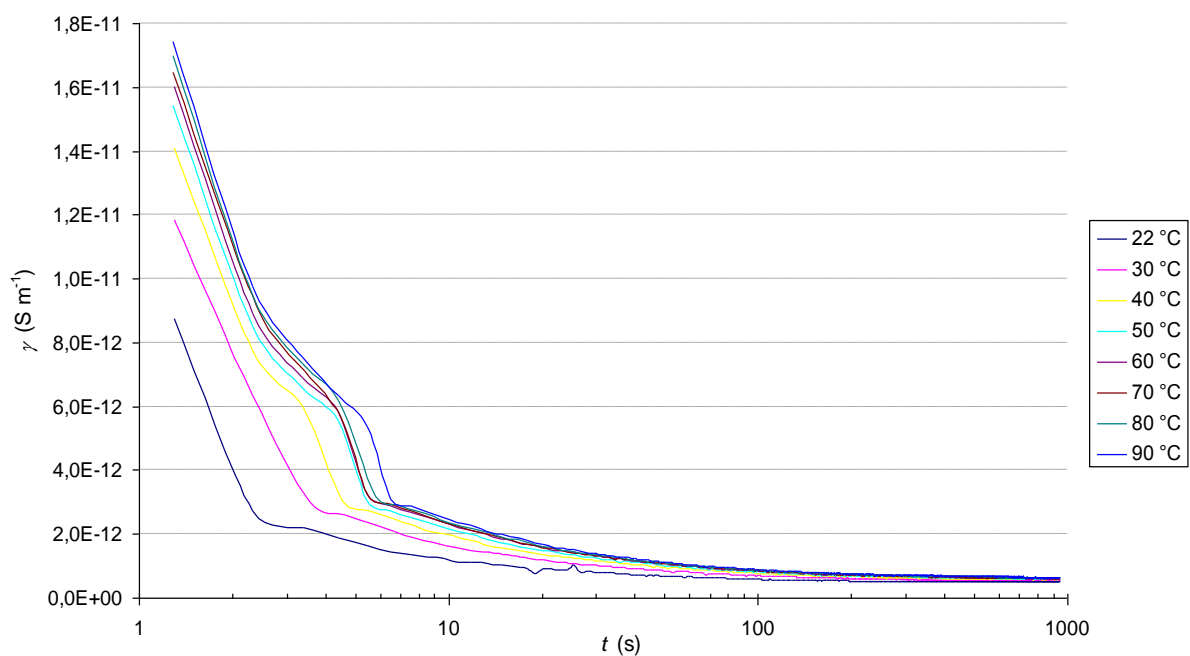
Obr. 24: Závislost logaritmu elektrické vodivosti na převrácené hodnotě teploty oleje MIDEL 7131



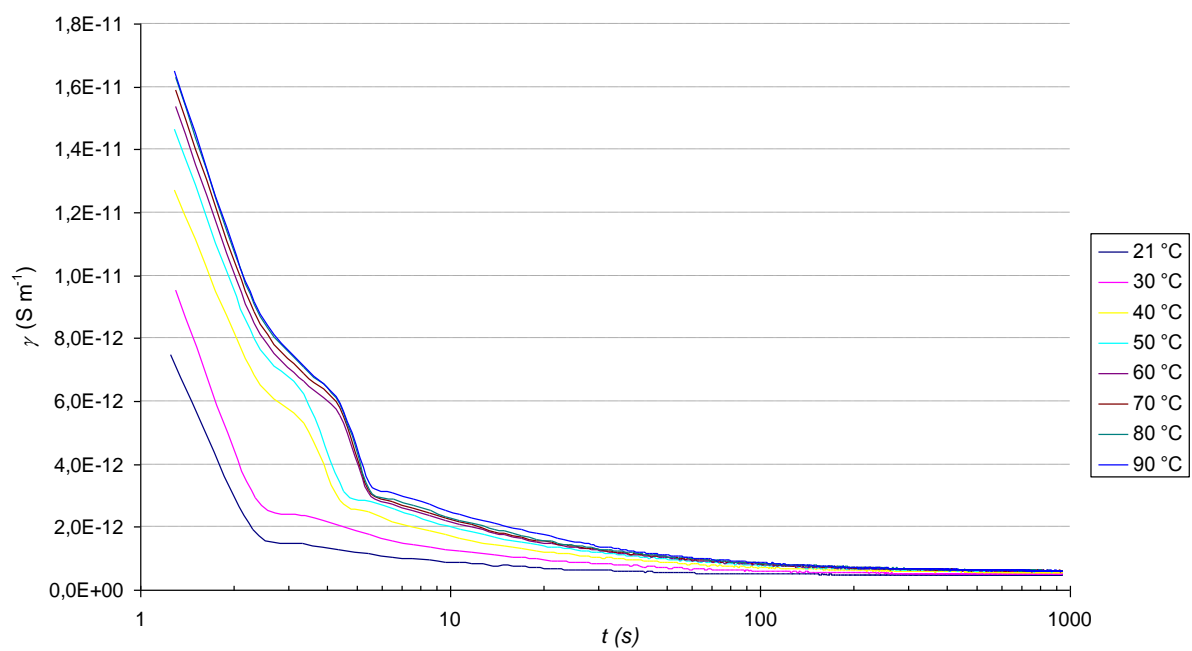
Obr. 25: Závislost logaritmu elektrické vodivosti na převrácené hodnotě teploty oleje MIDEL 7131 po elektrickém namáhání



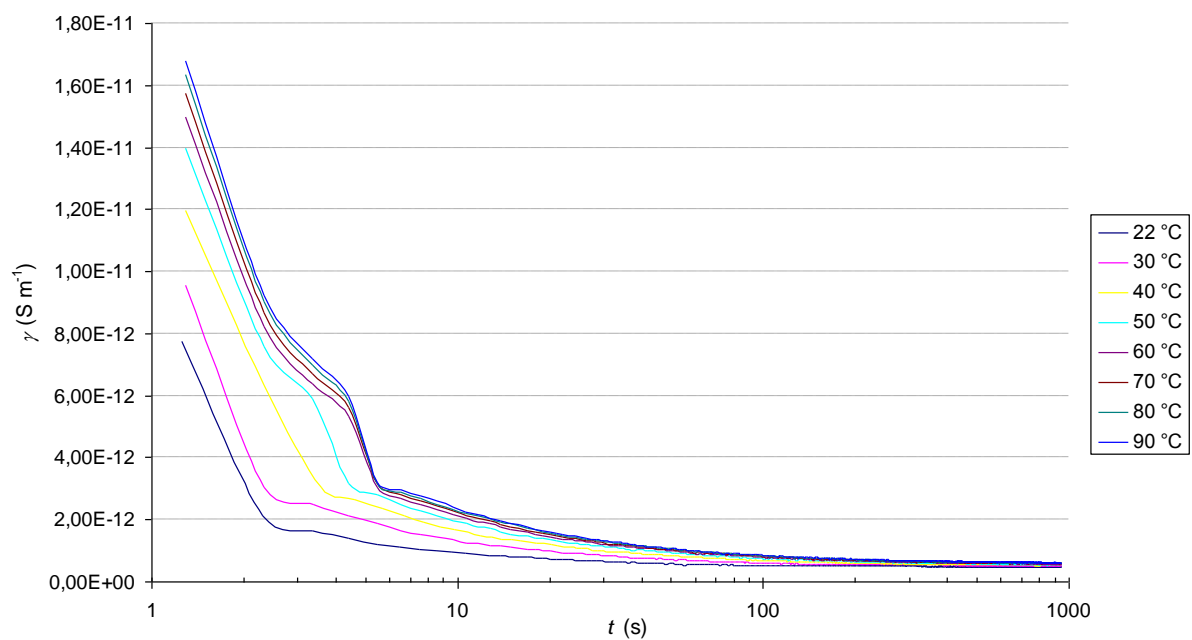
Obr. 26: Závislost logaritmu elektrické vodivosti na převrácené hodnotě teploty oleje MIDEL 7131 po tepelném namáhání



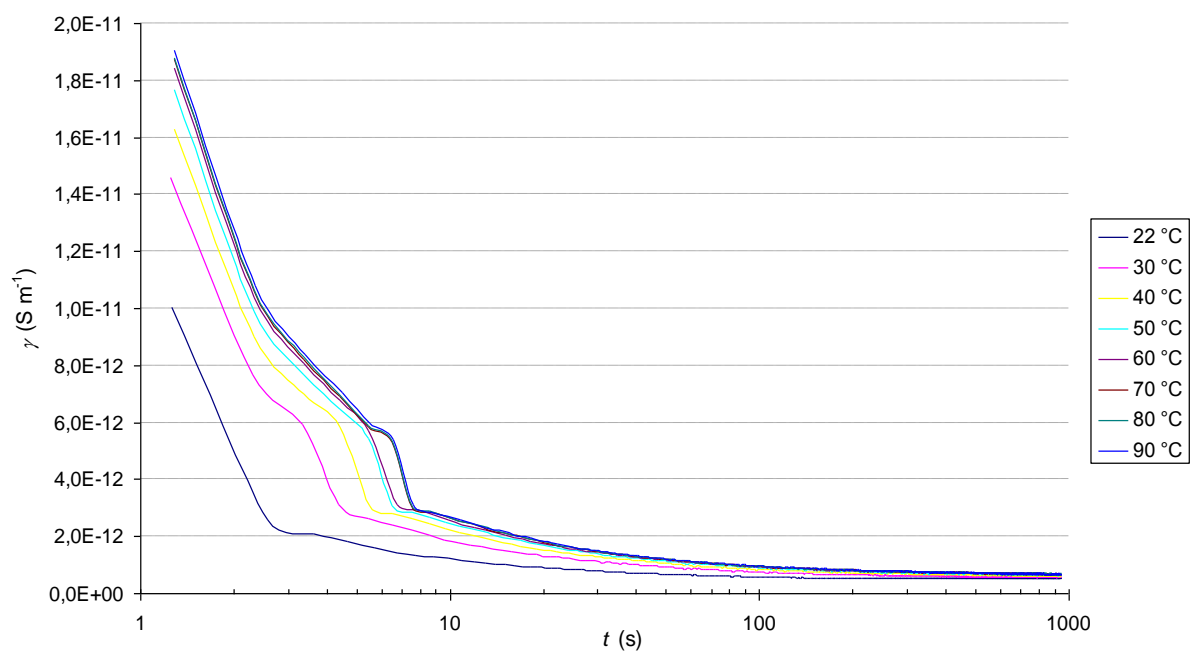
Obr. 27: Závislost elektrické vodivosti na čase při různých teplotách oleje ESTO BNX



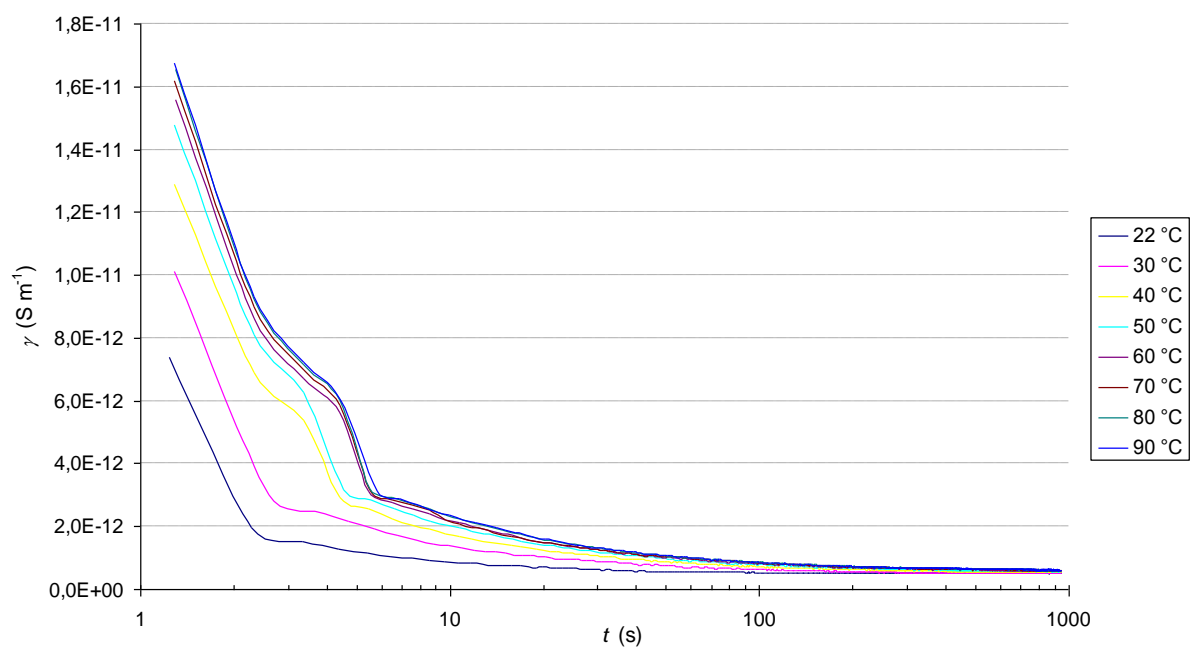
Obr. 28: Závislost elektrické vodivosti na čase při různých teplotách oleje RENOLIN ELTEC



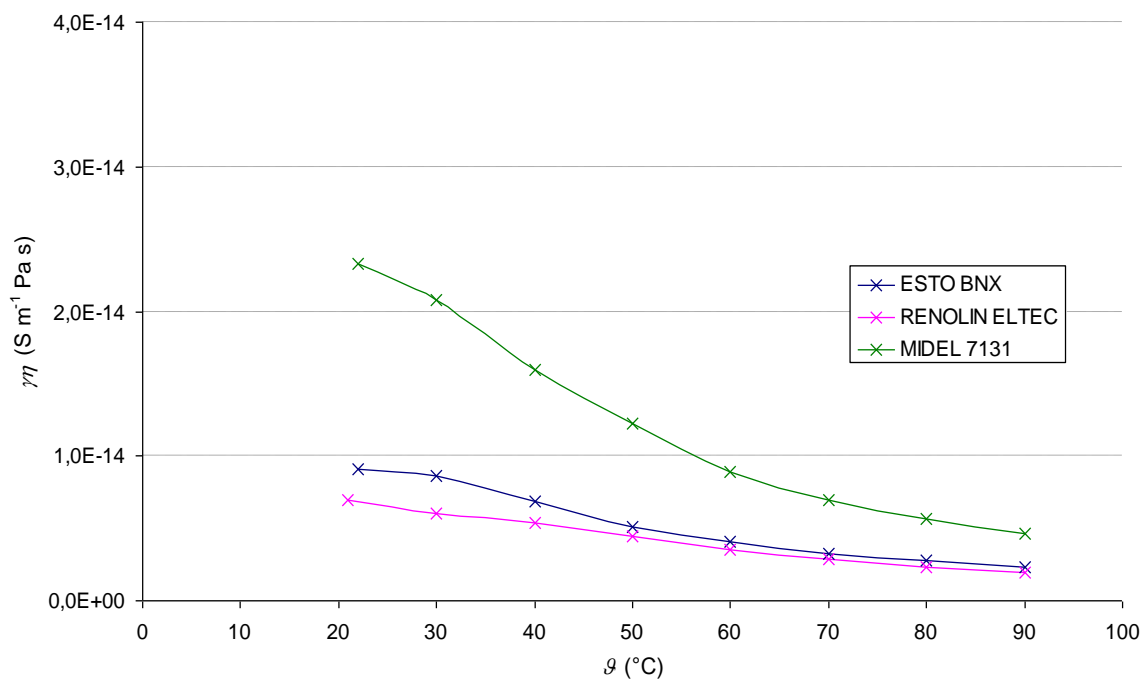
Obr. 29: Závislost elektrické vodivosti na čase při různých teplotách oleje MIDEL 7131



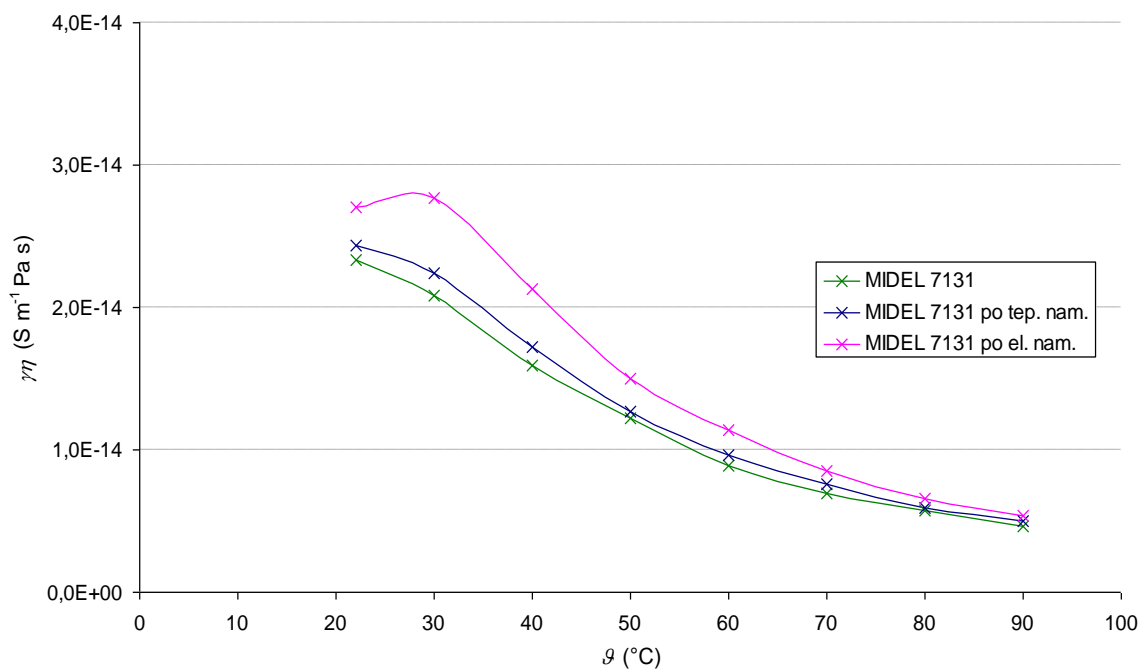
Obr. 30: Závislost elektrické vodivosti na čase při různých teplotách oleje MIDEL 7131 po elektrickém namáhání



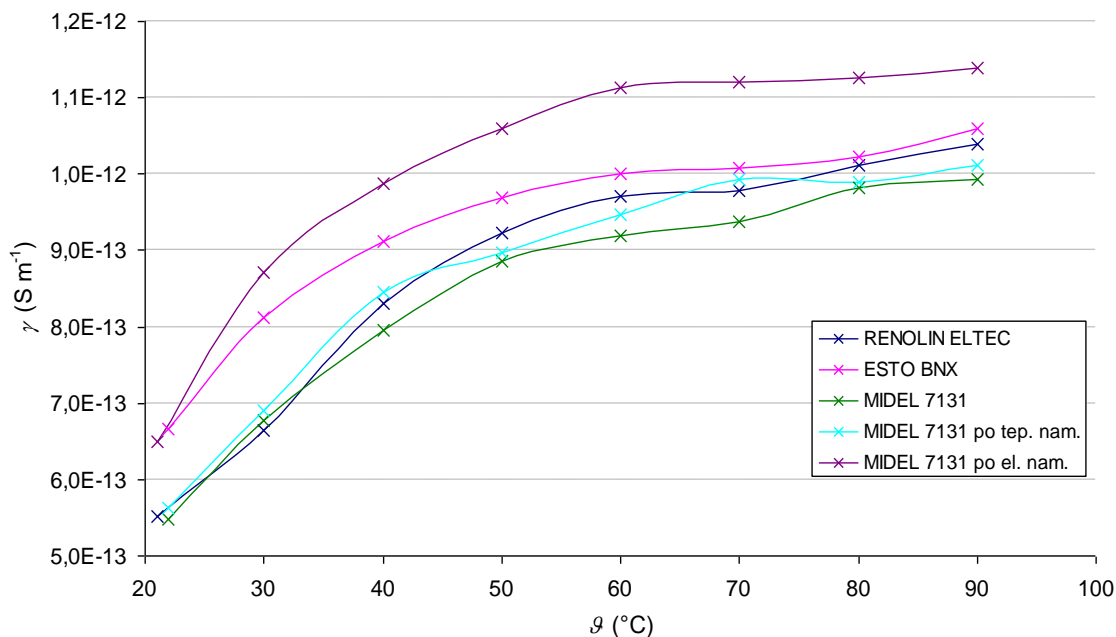
Obr. 31: Závislost elektrické vodivosti na čase při různých teplotách oleje MIDEL 7131 po tepelném namáhání



Obr. 32: Aplikace Waldenova zákona pro jednotlivé vzorky oleje



Obr. 33: Aplikace Waldenova zákona pro olej MDEL 7131 před a po tepelném a elektrickém namáhání



Obr. 34: Závislost elektrické vodivosti na teplotě

Z obr. 32 a obr. 33 lze vidět, že součin elektrické vodivosti a dynamické viskozity z rostoucí teplotou klesá. Vazby mezi molekulami jsou silnější než vazby mezi ionty a molekuly a neplatí tedy rovnost hodnot jejich vazebních energií. Pokles dynamické viskozity je rychlejší než nárůst elektrické vodivosti.

V grafech (obr. 27 - obr. 31) je uvedená elektrická vodivost, vypočítaná z nabíjecích proudů, v závislosti na čase při napětí 500 V. Hodnoty minutové vnitřní rezistivity u všech vzorků odpovídaly hodnotám katalogovým. Nejlepší vlastnosti, týkající se elektrické vodivosti v závislosti na teplotě vykazuje olej MIDEL 7131 a to i po tepelném namáhání. Z obr. 34 lze vidět, že po elektrickém namáhání došlo ke změně struktury vzorku, což způsobilo zvýšení elektrické vodivosti oleje.

Závěr

V teoretické části práce jsem se zaměřil na studium dynamické viskozity a elektrické vodivosti kapalných izolantů a uvedl jsem různé diagnostické metody pro sledování těchto veličin. Rovněž jsem zpracoval přehled elektroizolačních olejů používaných v elektrotechnickém průmyslu.

V experimentální části jsem sestavil pracoviště pro sledování dynamické viskozity v širším rozsahu teplot pomocí dvou diagnostických metod - Höpplerova viskozimetru a vibračního viskozimetru SV - 10. Pro měření dynamické viskozity viskozimetrem SV - 10 jsem vytvořil program v programovacím prostředí VEE (obr. 14).

V průběhu experimentu byly sledovány a zaznamenávány hodnoty hustoty, dynamické viskozity a elektrické vodivosti minerálních transformátorových olejů ESTO BNX, RENOLIN ELTEC a biologicky odbouratelného transformátorového oleje MIDEL 7131, který byl navíc měřen před a po elektrickém a tepelném namáhání.

Z měření hustoty jsem stanovil součinitel teplotní roztažnosti pro jednotlivé vzorky oleje, jehož hodnoty se nacházejí v tab. 6.

Z naměřených hodnot dynamické viskozity lze napsat pro jednotlivé vzorky oleje její funkci závislosti na teplotě. Pro vyjádření této funkce jsem použil přesnějších hodnot naměřených pomocí vibračního viskozimetru SV - 10.

$$\text{ESTO BNX} \quad \eta = \exp\left(-14,383 + \frac{2977,9}{T}\right)$$

$$\text{RENOLIN ELTEC} \quad \eta = \exp\left(-14,775 + \frac{3060,0}{T}\right)$$

$$\text{MIDEL 7131} \quad \eta = \exp\left(-15,523 + \frac{3649,0}{T}\right)$$

$$\text{MIDEL 7131 po elektrickém namáhání} \quad \eta = \exp\left(-15,468 + \frac{3639,3}{T}\right)$$

$$\text{MIDEL 7131 po tepelném namáhání} \quad \eta = \exp\left(-15,358 + \frac{3605,9}{T}\right)$$

Z naměřených hodnot elektrické vodivosti v závislosti na teplotě lze napsat pro jednotlivé vzorky oleje:

$$\text{ESTO BNX} \quad \gamma = 6,21 \cdot 10^{-12} \cdot \exp\left(-\frac{623,2}{T}\right)$$

$$\text{RENOLIN ELTEC} \quad \gamma = 1,49 \cdot 10^{-11} \cdot \exp\left(-\frac{933,66}{T}\right)$$

$$\text{MIDEL 7131} \quad \gamma = 1,15 \cdot 10^{-11} \cdot \exp\left(-\frac{859,66}{T}\right)$$

$$\text{MIDEL 7131 po elektrickém namáhání} \quad \gamma = 9,70 \cdot 10^{-12} \cdot \exp\left(-\frac{745,2}{T}\right)$$

$$\text{MIDEL 7131 po tepelném namáhání} \quad \gamma = 1,15 \cdot 10^{-11} \cdot \exp\left(-\frac{850,11}{T}\right)$$

Nejlepší vlastnosti z hlediska elektrické vodivosti má biologicky odbouratelný olej MIDEL 7131, na druhou stranu je jeho nevýhodou velmi vysoká dynamická viskozita, což je nežádoucí hlavně pro jeho použití jako transformátorového oleje, kde je požadována hodnota

viskozity co nejmenší. I přes tento nedostatek je olej vhodnou náhradou minerálních olejů. Olej zachoval dobré elektrické vlastnosti i po tepelném namáhání. Po elektrickém namáhání se jeho elektrické vlastnosti značně zhoršily (obr. 34).

Z použitých měřících metod k diagnostice aktuálního stavu kapalných izolantů po tepelném a elektrickém namáhání jsou nejvhodnější metody měření dynamické viskozity vibračním viskozimetrem SV – 10 a měření elektrické vodivosti pomocí systému Tettex 2903.

Literatura

- [1] KOCMAN, V. Fyzika a technologie elektrotechnických materiálů - Izolanty A. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1971. 26 s.
- [2] MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. 1. vyd. Praha : BEN - technická literatura, 2006. 240 s. ISBN 80-7300-189-6.
- [3] MENTLÍK, Václav, et al. *Diagnostika elektrických zařízení*. 1. vyd. Praha : BEN - technická literatura, 2008. 440 s. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [4] ARTBAUER, Jan; ŠEDOVIČ, Juraj; ADAMEC, Vladimír . *Izolanty a Izolácie*. Prvé vydanie. Bratislava : Alfa, 1969. 620 s. ISBN 63-060-69.
- [5] HASSDENTEUFEL, Josef, et al. *Elektrotechnické materiály*. 2. Vydání. Bratislava : Alfa, 1978. 607 s. ISBN 63-555-78.
- [6] JANALÍK, Jaroslav; ŠTÁVA, Pavel. *Mechanika tekutin*. Ostrava: VŠB, elektronické skripta.
- [7] DVOŘÁK, Lukáš. *Vlastnosti tekutin*. Ostrava: VŠB, elektronické skripta.
- [8] JIRÁK, Josef. *Materiály a technická dokumentace*. Brno : VUT, elektronické skripta.
- [9] KAZELLE, Jiří. *Materiály a výrobní procesy*. Brno : VUT, elektronické skripta.
- [10] Tettex A.G. Zurich, *Schutzringkondensatoren Typen 2902 und 2904*.
- [11] VEB MLV PRÜFDERÄTE+WERK MEDINGEN, *Höpplerův viskozimetr B3 – Návod k obsluze*.
- [12] KEITHLEY INSTRUMENTS. *Instruction manual model 617 programmable electrometer*. [s.l.] : [s.n.], 1988.
- [13] KEITHLEY INSTRUMENTS. *Model 6517A electrometer users manual*. [s.l.] : [s.n.], 2003.
- [14] A&D COMPANY. *SV – 10 SV – 100 Vibro Viscometer instruction manual*. [s.l.] : [s.n.], 2008.
- [15] A&D COMPANY. *SV – 10/SV – 100 Vibrační viskozimetr se sinusovou křivkou*. [s.l.] : [s.n.], 2008.
- [16] *Měření viskozity* [online]. [cit. 2010-03-04]. Dostupný z WWW:<vscht.cz/ufmt/cs/pomucky/uhrovah/skripta/Uloha%203.pdf>
- [17] *Density of Fluids - Changing Pressure and Temperature* [online]. 2005 [cit. 2009-05-06]. Dostupný z WWW: <http://www.engineeringtoolbox.com/fluid-density-temperature-pressure-d_309.html>.

- [18] *Metody měření reologických vlastností kapalin* [online]. [cit. 2009-05-06]. Dostupný z WWW: <kf.upce.cz/Reologie%20a%20reometrie%20kapalin.doc>.
- [19] *Perspektivy v oblasti kapalných izolantů* [online]. [cit. 2010-02-03]. Dostupný z WWW: <<http://ketsrv.fel.zcu.cz/diagnostika/konference/Sbornik/Sekce2/105.pdf>>.
- [20] *Elektrické a kombinované stárnutí izolačních materiálů* [online]. [cit. 2010-02-03]. Dostupný z WWW: <<http://147.228.94.20:12100/casopis/images/PDF/Rocnik2007/cislo1/r0c1c2.pdf>>.
- [21] *Stericell s nucenou cirkulací vzduchu*. [online]. [cit. 2010-24-05]. Dostupný z WWW: <http://katerinalucakova.websnadno.cz/bmt_-_stericell.pdf>.
- [22] *Technická informace RENOLIN ELTEC*. [online]. [cit. 2010-24-05]. Dostupný z WWW: <http://www.hazmioil.cz/PI/2006/poe_PI4-1141.pdf>.
- [23] *MIDEL 7131 biologicky odbouratelný, nehořlavý transformátorový olej*. [online]. [cit. 2010-24-05]. Dostupný z WWW: <http://midel.sk/image/_soubor_nabidka.php?id=6>.
- [24] Energetické strojírny Brno, a.s. *Materiálový list transformátorového oleje ESTO BNX*, 2003.

Seznam symbolů

A, B, C	konstanta	(-)
b	pohyblivost nábojů	(m ² s ⁻¹ V ⁻¹)
c	koncentrace iontů	(mol m ⁻³)
C_0	kapacita prázdné elektrické nádoby	(F)
c_0	koncentrace nabitých částic	(mol m ⁻³)
d	vzdálenost ploch	(m)
E	intenzita el. pole	(V m ⁻¹)
E_k	mezní intenzita el. pole	(V m ⁻¹)
E_p	elektrická pevnost	(V m ⁻¹)
F	síla vztahující se na jednotku plochy	(N m ⁻²)
f	síla	(N)
f_0	kmitočet vlastních tepelných kmitů okolo rovnovážných poloh	(Hz)
g	tíhové zrychlení	(m s ⁻²)
h	tloušťka vzorku, výška sloupce kapaliny	(m)
I, I_x	proud	(A)
I_0	proud při E_k	(A)
K	konstanta kuličky	(mPa cm ³ g ⁻¹)
k	Boltzmannova konstanta	(J K ⁻¹)
l	délka trubice	(m)
M	moment síly	(N m)
m	hmotnost	(g)
N	indikátor	(-)
n	koncentrace volných nosičů náboje	(m ⁻³)
q	náboj iontu	(C)
R	izolační elektrický odpor	(Ω)
R	univerzální konstanta plynu	(J K ⁻¹ mol ⁻¹)
R_A, R_X	elektrický odpor	(Ω)
R_B	elektrický odpor	(Ω)
R_N	referenční odpor	(Ω)
R_v	hodnota vnitřního elektrického odporu	(Ω)
r, r_1, r_2	poloměr trubice	(m)
S	plocha elektrod	(m ²)
T	termodynamická teplota	(K)
T_0	srovnávací teplota	(K)
t, t_0	čas	(s)
\bar{t}	průměrný čas	(s)
t	smykové napětí	(N m ²)
t_0, t_1	teplota	(°C)
U	napětí	(V)
U_M	měrné napětí	(V)
U_K	kompensační napětí	(V)
U_p	průrazné napětí	(V)
u	pohyblivost iontů	(m ² s ⁻¹ V ⁻¹)
V	objem	(m ³)
V	objemový průtok	(m ³ s ⁻¹)
v, v_0	rychlost	(m s ⁻¹)

ν	kinetická viskozita	(m ² s ⁻¹)
ν_m	mezní rychlost	(m s ⁻¹)
$\bar{\nu}$	střední rychlost proudění	(m s ⁻¹)
W	výška potenciálové bariéry	(kJ mol ⁻¹)
W_a, W_g	aktivační energie, energie	(eV)
z	počet přeskoků	(-)
α	úhel štěrbiny	(rad)
β	objemová roztažnost	(°C ⁻¹)
Δp	tlakový spád	(Pa)
ϵ_0	permitivita vakua	(F m ⁻¹)
γ	elektrická vodivost	(S m ⁻¹)
γ_0	hodnota konduktivity při teplotě 0 °C	(S m ⁻¹)
γ_k	elektroforetická vodivost	(S m ⁻¹)
η	dynamická viskozita	(Pa s)
η_D	viskozita získána z přístroje SV - 10	(Pa s)
ϑ	teplota	(°C)
ϑ_T	trvalá teplota stárnutí	(°C)
ρ	rezistivita	(Ω m)
ρ	hustota kapaliny	(kg cm ⁻³)
ρ_v	vnitřní rezistivita	(Ω m)
ρ_0, ρ_l	hustota	(kg m ⁻³)
ρ_k	hustota kuličky	(kg cm ⁻³)
τ	tečné napětí	(Pa)
τ	doba života	(s)
τ_E	doba života při elektrickém namáhání	(s)
ω	úhlová rychlost	(rad s ⁻¹)